



No. 1/JHI/SP/V/26

Jakarta, 21 Mei 2026

Kepada Yth.

Tim ISBN dan KDT
Perpustakaan Nasional Republik Indonesia
Jalan Salemba Raya No. 28 A
DKI Jakarta 10430

Hal : Permohonan ISBN dan KDT

Dengan Hormat,
Kami Penerbit Yayasan John Hi-Tech Idetama, anggota IKAPI DKI Jakarta no. Anggota:
566/DKI/2018

Pada kesempatan ini, kami mengajukan permohonan ISBN dan Barcode
untuk buku dengan spesifikasi

- Penerbit : Yayasan John Hi-Tech Idetama
- Judul : **CONCRETE REPAIR TECHNOLOGY**
From Damage Mechanism To Sustainable Infrastructure
- Jumlah halaman : 235 halaman
- Jumlah Produksi : 300 eks
- Ukuran : A4 = (17,6 x 25 cm)
- 1. Penulis : Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.
Dr. Partogi H Simatupang, ST., MT.
- Rencana terbit di Bulan Mei 2026 ini, Berikut kami Lampirkan :
 1. Halaman Judul
 2. Balik Halaman Judul
 3. Kata Pengantar
 4. Daftar Isi

Demikian permohonan kami atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Hormat Kami

Prof. Dr. Ir. Jonbi, MT., MM., MSi, INV



Penerbit Yayasan
John Hi-Tech Idetama

CONCRETE REPAIR TECHNOLOGY

*From Damage Mechanisms
to Sustainable Infrastructure*

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M. T.
Dr. Partogi H. Simatupang, S.T., M. T.

Judul Buku:

Concrete Repair Technology: From Damage Mechanisms to Sustainable Infrastructure

Penulis:

Dr.Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

Dr. Parttogi H Simatupang, S.T., M.T.

Editor:

Jonbi

Desain cover: modifikasi Notebook LM-AI

Hak pengarang dan penerbit dilindungi Undang-undang

Penerbit:

Yayasan John Hi-Tech Idetama

Anggota IKAPI No. 566/DKI/2018

Buku Referensi **Concrete Repair Technology**

SN: 053

Edisi pertama, Cetakan 1, 2026

ISBN:



Penerbit Yayasan
John Hi-Tech Idetama

CONCRETE REPAIR TECHNOLOGY

*From Damage Mechanisms
to Sustainable Infrastructure*

**Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M. T.
Dr. Partogi H. Simatupang, S.T., M. T.**

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Concrete Repair Technology: From Damage Mechanisms to Sustainable Infrastructure* ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik.

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur modern. Namun demikian, berbagai penelitian dan pengalaman lapangan menunjukkan bahwa struktur beton sering mengalami degradasi dini akibat kombinasi mekanisme kerusakan material, kesalahan desain, mutu pelaksanaan, serta paparan lingkungan yang semakin agresif. Kondisi tersebut tidak hanya berdampak pada penurunan kinerja dan keselamatan struktur, tetapi juga menimbulkan konsekuensi ekonomi dan lingkungan yang signifikan. Oleh karena itu, penguasaan teknologi repair dan rehabilitasi beton menjadi kebutuhan yang tidak terpisahkan dari pengelolaan infrastruktur berkelanjutan.

Buku ini disusun dengan pendekatan berbasis mekanisme kerusakan (*damage mechanisms*) sebagai fondasi utama dalam perancangan dan penerapan teknologi repair beton. Pendekatan ini menekankan bahwa keberhasilan repair beton tidak dapat dicapai melalui solusi generik, melainkan harus didasarkan pada pemahaman yang komprehensif terhadap penyebab kerusakan, kondisi lingkungan, serta tuntutan kinerja jangka panjang struktur. Sejalan dengan perkembangan ilmu dan praktik rekayasa modern, buku ini juga mengintegrasikan konsep durabilitas, performance-based design, dan sustainability dalam setiap tahapan teknologi repair beton.

Materi yang disajikan dalam buku ini mencakup pembahasan menyeluruh mulai dari konsep dasar dan terminologi repair beton, mekanisme kerusakan, metode inspeksi dan diagnosis, prinsip

desain repair, material repair konvensional dan inovatif, teknologi perbaikan pada berbagai kondisi lingkungan agresif, hingga aspek pelaksanaan, quality control, evaluasi kinerja, studi kasus, serta arah masa depan teknologi repair beton. Seluruh pembahasan didukung oleh referensi ilmiah terkini dari jurnal bereputasi internasional serta standar utama seperti ACI, EN, ISO, dan fib Model Code, sehingga buku ini memiliki landasan ilmiah yang kuat dan relevan dengan praktik global.

Buku ini ditujukan sebagai buku referensi bagi mahasiswa program Sarjana (S1), Magister (S2) dan Doktor (S3) Teknik Sipil, khususnya pada bidang teknologi beton, durabilitas struktur, dan rehabilitasi struktur. Selain itu, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi profesional bagi para insinyur, konsultan, kontraktor, akademisi, serta pengambil kebijakan yang terlibat dalam perencanaan, pelaksanaan, dan pengelolaan infrastruktur beton. Dengan pendekatan yang menghubungkan mekanisme kerusakan dengan solusi repair yang berkelanjutan, buku ini diharapkan mampu menjembatani kebutuhan akademik dan praktik lapangan.

Penulis menyadari bahwa teknologi repair beton merupakan bidang yang terus berkembang seiring kemajuan material inovatif, teknologi digital, dan tuntutan pembangunan rendah karbon. Oleh karena itu, buku ini tidak hanya disusun sebagai dokumentasi pengetahuan saat ini, tetapi juga sebagai referensi yang adaptif terhadap perkembangan masa depan. Diharapkan buku ini dapat mendorong penerapan teknologi repair beton yang lebih andal, efisien, dan berkontribusi nyata terhadap pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan kontribusi dalam penyusunan buku ini. Semoga buku *Concrete Repair Technology: From Damage Mechanisms to Sustainable Infrastructure* dapat memberikan manfaat luas bagi

pengembangan ilmu pengetahuan, peningkatan kualitas praktik rekayasa, serta pembangunan infrastruktur yang aman, tahan lama, dan berkelanjutan.

Jakarta, Mei 2026

Dr.Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.

Dr. Ir. Partogi H Simatupang, ST., MT

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vii
 Bab 1. Pendahuluan Teknologi Repair Beton.....	 1
1.1 Latar Belakang dan Urgensi Repair Beton.....	1
1.2 Posisi Repair Beton dalam Siklus Hidup Struktur	4
1.3 Definisi dan Terminologi Repair Beton	6
1.4 Penyebab Umum Kegagalan Dini Beton	11
1.5 Dampak Ekonomi dan Lingkungan dari Kerusakan Beton	14
1.6 Evolusi Teknologi Repair Beton.....	15
1.7 Ruang Lingkup	16
1.8 Model Kuantitatif Degradasi Beton dan Kebutuhan Repair	18
1.9 Model Kuantitatif Siklus Hidup: Repair VS Rekonstruksi..	19
1.10 Model Emisi Karbon: Repair sebagai Strategi Dekarbonisasi.....	22
1.11 Model Keputusan Repair Berbasis Ambang Kinerja	22
 Bab 2. Mekanisme Kerusakan Beton.....	 23
2.1 Retak Beton: Shrinkage, Thermal, dan Structural Cracking	23
2.2 Korosi Tulangan dan Interaksi Baja-Beton	26
2.3 Degradasi Kimia: Sulfat, Asam, dan Alkali-Silica Reaction (ASR)	28
2.4 Degradasi Fisik: Abrasi, Erosi, dan Fatigue	30
2.5 Biodeterioration dan Pengaruh Lingkungan Mikroba	31
2.6 Interaksi Multimekanisme Kerusakan Beton	33
2.7 Model Difusi Klorida dalam Beton (Fick's Second Law)	35
2.8 Implikasi Mekanisme Kerusakan terhadap Strategi Repair	37
2.9 Model Gabungan: Klorida + Karbonasi	40
2.10 Implikasi Langsung terhadap Strategi Repair	41
2.11 Ringkasan Kuantitatif Bab 2	42

Bab 3. Inspeksi dan Diagnosis Kerusakan Beton.....	43
3.1 Tujuan dan Prinsip Inspeksi Struktur Beton.....	43
3.2 Inspeksi Visual dan Damage Mapping.....	45
3.3 Metode Non-Destructive Testing (NDT)	46
3.4 Metode Semi-Destructive Testing (SDT)	47
3.5 Evaluasi Tingkat Kerusakan dan Kinerja Struktur	49
3.6 Prediksi Umur Layanan Sisa (<i>Remaining Service Life</i>)	50
3.7 Decision Matrix untuk Strategi Repair	51
3.8 Konsep Remaining Service Life (RSL)	52
3.9 Dua Fase Umum Layanan Beton Bertulang.....	53
3.10 Model Kuantitatif Remaining Service Life	53
3.11 Pengaruh Degradasi terhadap (β)	55
3.12 Efek Repair terhadap Reliability Index	56
3.13 Decision Rule Berbasis RSL & (β)	56
Bab 4. Prinsip Desain Repair Beton	57
4.1 Tujuan Desain Repair Beton.....	57
4.2 Konsep <i>Compatibility</i> dalam Repair Beton.....	58
4.3 Kompatibilitas Termal dan Shrinkage	60
4.4 Durability-Based Repair Design	61
4.5 Design Repair Berbasis Umur Layanan (<i>Service Life Design</i>)	62
4.6 Pemilihan Material Repair Berbasis Desain.....	63
4.7 Detail Desain dan Pelaksanaan Repair	64
4.8 Evaluasi Risiko dan Kegagalan Repair	64
4.9 Desain Repair Berbasis Compatibility	64
Bab 5. Material Repair Beton Konvensional.....	69
5.1 Klasifikasi Material Repair Beton	69
5.2 Mortar dan Beton Repair Berbasis Semen.....	70
5.3 Material Repair Termodifikasi Polimer	72
5.4 Sistem Grouting dan Injection Konvensional	73

5.5 Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Material Konvensional	74
5.6 Kriteria Pemilihan Material Repair Konvensional	76
5.7 Keterbatasan Material Repair Konvensional.....	76
5.8 Parameter Material Repair Beton.....	76

Bab 6. Material Repair Beton Inovatif 83

6.1 Latar Belakang Material Repair Inovatif.....	83
6.2 Engineered Cementitious Composite (ECC) untuk Repair Beton.....	84
6.3 Geopolymer sebagai Material Repair Beton.....	86
6.4 Material Repair Rendah Karbon (Low Carbon Repair)	87
6.5 Kompatibilitas dan Desain Material Repair Inovatif	89
6.6 Aspek Keberlanjutan dan Life Cycle Assessment.....	89
6.7 Tantangan Implementasi di Lapangan	90
6.8 Parameter Kuantitatif ECC & Geopolimer	90

Bab 7. Teknologi Repair Retak Beton 95

7.1 Klasifikasi dan Karakteristik Retak Beton	95
7.2 Prinsip Dasar Repair Retak Beton.....	96
7.3 Teknologi Crack Injection	97
7.4 Routing and Sealing.....	98
7.5 Stitching dan Mechanical Crack Repair	99
7.6 Overlay dan Surface Treatment untuk Pengendalian Retak	99
7.7 Teknologi Self-Healing Concrete untuk Repair Retak.....	100
7.8 Evaluasi Keberhasilan Repair Retak Beton.....	101
7.9 Model Lebar Retak, Laju Korosi & Efektivitas Repair Beton	102

Bab 8. Teknologi Repair Beton Terkorosi 107

8.1 Mekanisme Korosi Tulangan dalam Beton	107
8.2 Prinsip Dasar Repair Beton Terkorosi.....	109
8.3 Patch Repair Konvensional.....	110
8.4 Penggunaan Corrosion Inhibitor	111
8.5 Cathodic Protection	111
8.6 Electrochemical Repair Techniques.....	113
8.7 Kombinasi Strategi Repair Beton Terkorosi.....	114
8.8 Evaluasi Kinerja dan Monitoring Pasca-Repair.....	114
8.9 Model Kuantitatif Repair Beton Terkorosi.....	114

Bab 9. Teknologi Repair Beton Akibat Degradasi Kimia dan Lingkungan Agresif..... 121

9.1 Jenis dan Mekanisme Degradasi Kimia Beton.....	121
9.2 Serangan Sulfat dan Teknologi Repair	122
9.3 Serangan Asam dan Lingkungan Industri	124
9.4 Alkali-Silica Reaction (ASR) dan Strategi Repair	124
9.5 Leaching dan Soft Water Attack	125
9.6 Biodeterioration dan Lingkungan Mikroba	125
9.7 Prinsip Desain Repair Beton pada Lingkungan Agresif	126
9.8 Evaluasi Kinerja dan Monitoring Pasca-Repair.....	127
9.9 Model Kuantitatif Repair Beton Akibat Degradasi Kimia & Lingkungan Agresif	128

Bab 10. Teknologi Repair Beton pada Lingkungan Laut dan Infrastruktur Khusus..... 133

10.1 Karakteristik Lingkungan Laut terhadap Beton.....	133
10.2 Mekanisme Kerusakan Beton di Lingkungan Laut	134
10.3 Prinsip Dasar Repair Beton di Lingkungan Laut	136
10.4 Patch Repair dan Recasting pada Struktur Laut	136
10.5 Proteksi Korosi pada Infrastruktur Laut	137
10.6 Coating, Lining, dan Surface Protection.....	139

10.7 Teknologi Repair Inovatif untuk Infrastruktur Laut	139
10.8 Monitoring dan Manajemen Aset Infrastruktur Laut.....	140

Bab 11. Pelaksanaan, Quality Control, dan

Evaluasi Kinerja Repair Beton..... 143

11.1 Prinsip Umum Pelaksanaan Repair Beton.....	143
11.2 Persiapan Permukaan Beton dan Tulangan	145
11.3 Aplikasi Material Repair dan Curing.....	146
11.4 Quality Control pada Pekerjaan Repair Beton.....	148
11.5 Pengendalian Mutu Berbasis Kinerja	149
11.6 Evaluasi Kinerja Pasca-Repair	149
11.7 Monitoring Jangka Panjang dan Manajemen Aset.....	151
11.8 Dokumentasi dan Evaluasi Kegagalan Repair.....	151
11.9 Pelaksanaan, Quality Control, dan Evaluasi Kinerja Repair Beton.....	152

Bab 12. Studi Kasus, Best Practice, dan Arah Masa Depan Teknologi Repair Beton 161

12.1 Peran Studi Kasus dalam Teknologi Repair Beton.....	161
12.2 Studi Kasus Repair Beton pada Infrastruktur Perkotaan	161
12.3 Studi Kasus Infrastruktur Laut dan Pesisir	162
12.4 Studi Kasus Lingkungan Industri dan Limbah	164
12.5 Best Practice dalam Teknologi Repair Beton.....	164
12.6 Peran Standar dan Regulasi Internasional.....	165
12.7 Digitalisasi dan Teknologi Cerdas dalam Repair Beton....	165
12.8 Material Repair Masa Depan dan Keberlanjutan	167
12.9 Tantangan dan Agenda Riset Mendatang.....	167
12.10 TanModel Kuantitatif LCC & CO ₂ saving pada Teknologi Repair Beton.....	168

Bab 13. Manajemen Risiko dan Keandalan dalam Repair

Beton..... 173

13.1 Konsep Risiko dan Reliability pada Struktur Beton	173
13.2 Probabilistic Deterioration Modeling.....	177
13.3 Reliability-Based Repair Planning.....	178
13.4 Analisis Ketidakpastian dalam Desain Repair	181
13.5 Risk-Based Inspection (RBI) dan Prioritisasi Repair	184
13.6 Model Keputusan Repair Berbasis Risiko dan Konsekuensi Kegagalan.....	185
13.7 Integrasi Risk Assessment dengan Digital Twin.....	187
13.8 Studi Numerik: Optimasi Waktu Repair	190

**Bab 14. Ekonomi Teknik, Life Cycle Cost Analysis (LCCA),
dan Strategi Pembiayaan Repair..... 195**

14.1 Prinsip Ekonomi Teknik dalam Infrastruktur Beton	195
14.2 Life Cycle Cost Analysis (LCCA) pada Repair Beton.....	197
14.3 Analisis Cost-Benefit: Repair vs Strengthening vs Replacement.....	198
14.4 Model Optimasi Biaya-Kinerja-Risiko	199
14.5 Social Cost dan Environmental Cost dalam Repair	200
14.6 Carbon Pricing dan Implikasi terhadap Strategi Repair ...	201
14.7 Skema Pembiayaan Infrastruktur dan Public-Private Partnership	202
14.8 Model Pengambilan Keputusan Multi-Kriteria (MCDM)	203

**DAFTAR PUSTAKA
INDEKS ISTILAH**



Penerbit Yayasan
John Hi-Tech Idetama

CONCRETE REPAIR TECHNOLOGY

*From Damage Mechanisms
to Sustainable Infrastructure*

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M. T.
Dr. Partogi H. Simatupang, S.T., M. T.



Penerbit Yayasan
John Hi-Tech Idetama

CONCRETE REPAIR TECHNOLOGY

*From Damage Mechanisms
to Sustainable Infrastructure*

Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M. T.
Dr. Partogi H. Simatupang, S.T., M. T.

Judul Buku:

Concrete Repair Technology: From Damage Mechanisms to Sustainable Infrastructure

Penulis:

Dr.Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

Dr. Parttogi H Simatupang, S.T., M.T.

Editor:

Jonbi

Desain cover: modifikasi Notebook LM-AI

Hak pengarang dan penerbit dilindungi Undang-undang

Penerbit:

Yayasan John Hi-Tech Idetama

Anggota IKAPI No. 566/DKI/2018

Buku Referensi **Concrete Repair Technology**

SN: 053

Edisi pertama, Cetakan 1, 2026

ISBN:

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Concrete Repair Technology: From Damage Mechanisms to Sustainable Infrastructure* ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik.

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur modern. Namun demikian, berbagai penelitian dan pengalaman lapangan menunjukkan bahwa struktur beton sering mengalami degradasi dini akibat kombinasi mekanisme kerusakan material, kesalahan desain, mutu pelaksanaan, serta paparan lingkungan yang semakin agresif. Kondisi tersebut tidak hanya berdampak pada penurunan kinerja dan keselamatan struktur, tetapi juga menimbulkan konsekuensi ekonomi dan lingkungan yang signifikan. Oleh karena itu, penguasaan teknologi repair dan rehabilitasi beton menjadi kebutuhan yang tidak terpisahkan dari pengelolaan infrastruktur berkelanjutan.

Buku ini disusun dengan pendekatan berbasis mekanisme kerusakan (*damage mechanisms*) sebagai fondasi utama dalam perancangan dan penerapan teknologi repair beton. Pendekatan ini menekankan bahwa keberhasilan repair beton tidak dapat dicapai melalui solusi generik, melainkan harus didasarkan pada pemahaman yang komprehensif terhadap penyebab kerusakan, kondisi lingkungan, serta tuntutan kinerja jangka panjang struktur. Sejalan dengan perkembangan ilmu dan praktik rekayasa modern, buku ini juga mengintegrasikan konsep durabilitas, performance-based design, dan sustainability dalam setiap tahapan teknologi repair beton.

Materi yang disajikan dalam buku ini mencakup pembahasan menyeluruh mulai dari konsep dasar dan terminologi repair beton, mekanisme kerusakan, metode inspeksi dan diagnosis, prinsip

desain repair, material repair konvensional dan inovatif, teknologi perbaikan pada berbagai kondisi lingkungan agresif, hingga aspek pelaksanaan, quality control, evaluasi kinerja, studi kasus, serta arah masa depan teknologi repair beton. Seluruh pembahasan didukung oleh referensi ilmiah terkini dari jurnal bereputasi internasional serta standar utama seperti ACI, EN, ISO, dan fib Model Code, sehingga buku ini memiliki landasan ilmiah yang kuat dan relevan dengan praktik global.

Buku ini ditujukan sebagai buku referensi bagi mahasiswa program Sarjana (S1), Magister (S2) dan Doktor (S3) Teknik Sipil, khususnya pada bidang teknologi beton, durabilitas struktur, dan rehabilitasi struktur. Selain itu, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi profesional bagi para insinyur, konsultan, kontraktor, akademisi, serta pengambil kebijakan yang terlibat dalam perencanaan, pelaksanaan, dan pengelolaan infrastruktur beton. Dengan pendekatan yang menghubungkan mekanisme kerusakan dengan solusi repair yang berkelanjutan, buku ini diharapkan mampu menjembatani kebutuhan akademik dan praktik lapangan.

Penulis menyadari bahwa teknologi repair beton merupakan bidang yang terus berkembang seiring kemajuan material inovatif, teknologi digital, dan tuntutan pembangunan rendah karbon. Oleh karena itu, buku ini tidak hanya disusun sebagai dokumentasi pengetahuan saat ini, tetapi juga sebagai referensi yang adaptif terhadap perkembangan masa depan. Diharapkan buku ini dapat mendorong penerapan teknologi repair beton yang lebih andal, efisien, dan berkontribusi nyata terhadap pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan kontribusi dalam penyusunan buku ini. Semoga buku *Concrete Repair Technology: From Damage Mechanisms to Sustainable Infrastructure* dapat memberikan manfaat luas bagi

pengembangan ilmu pengetahuan, peningkatan kualitas praktik rekayasa, serta pembangunan infrastruktur yang aman, tahan lama, dan berkelanjutan.

Jakarta, Mei 2026

Dr.Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.

Dr. Ir. Partogi H Simatupang, ST., MT

Naskah Pengajuan ISBN

Naskah Pengajuan ISBN

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vii
 Bab 1. Pendahuluan Teknologi Repair Beton.....	 1
1.1 Latar Belakang dan Urgensi Repair Beton.....	1
1.2 Posisi Repair Beton dalam Siklus Hidup Struktur	4
1.3 Definisi dan Terminologi Repair Beton	6
1.4 Penyebab Umum Kegagalan Dini Beton	11
1.5 Dampak Ekonomi dan Lingkungan dari Kerusakan Beton	14
1.6 Evolusi Teknologi Repair Beton.....	15
1.7 Ruang Lingkup	16
1.8 Model Kuantitatif Degradasi Beton dan Kebutuhan Repair	18
1.9 Model Kuantitatif Siklus Hidup: Repair VS Rekonstruksi..	19
1.10 Model Emisi Karbon: Repair sebagai Strategi Dekarbonisasi.....	22
1.11 Model Keputusan Repair Berbasis Ambang Kinerja	22
 Bab 2. Mekanisme Kerusakan Beton.....	 23
2.1 Retak Beton: Shrinkage, Thermal, dan Structural Cracking	23
2.2 Korosi Tulangan dan Interaksi Baja-Beton	26
2.3 Degradasi Kimia: Sulfat, Asam, dan Alkali-Silica Reaction (ASR)	28
2.4 Degradasi Fisik: Abrasi, Erosi, dan Fatigue	30
2.5 Biodeterioration dan Pengaruh Lingkungan Mikroba	31
2.6 Interaksi Multimekanisme Kerusakan Beton	33
2.7 Model Difusi Klorida dalam Beton (Fick's Second Law)	35
2.8 Implikasi Mekanisme Kerusakan terhadap Strategi Repair	37
2.9 Model Gabungan: Klorida + Karbonasi	40
2.10 Implikasi Langsung terhadap Strategi Repair	41
2.11 Ringkasan Kuantitatif Bab 2	42

Bab 3. Inspeksi dan Diagnosis Kerusakan Beton.....	43
3.1 Tujuan dan Prinsip Inspeksi Struktur Beton.....	43
3.2 Inspeksi Visual dan Damage Mapping.....	45
3.3 Metode Non-Destructive Testing (NDT)	46
3.4 Metode Semi-Destructive Testing (SDT)	47
3.5 Evaluasi Tingkat Kerusakan dan Kinerja Struktur	49
3.6 Prediksi Umur Layanan Sisa (<i>Remaining Service Life</i>)	50
3.7 Decision Matrix untuk Strategi Repair	51
3.8 Konsep Remaining Service Life (RSL)	52
3.9 Dua Fase Umum Layanan Beton Bertulang.....	53
3.10 Model Kuantitatif Remaining Service Life	53
3.11 Pengaruh Degradasi terhadap (β)	55
3.12 Efek Repair terhadap Reliability Index	56
3.13 Decision Rule Berbasis RSL & (β)	56
Bab 4. Prinsip Desain Repair Beton	57
4.1 Tujuan Desain Repair Beton.....	57
4.2 Konsep <i>Compatibility</i> dalam Repair Beton.....	58
4.3 Kompatibilitas Termal dan Shrinkage	60
4.4 Durability-Based Repair Design	61
4.5 Design Repair Berbasis Umur Layanan (<i>Service Life Design</i>)	62
4.6 Pemilihan Material Repair Berbasis Desain.....	63
4.7 Detail Desain dan Pelaksanaan Repair	64
4.8 Evaluasi Risiko dan Kegagalan Repair	64
4.9 Desain Repair Berbasis Compatibility	64
Bab 5. Material Repair Beton Konvensional.....	69
5.1 Klasifikasi Material Repair Beton	69
5.2 Mortar dan Beton Repair Berbasis Semen.....	70
5.3 Material Repair Termodifikasi Polimer	72
5.4 Sistem Grouting dan Injection Konvensional	73

5.5 Karakteristik Mekanik dan Durabilitas Material Konvensional	74
5.6 Kriteria Pemilihan Material Repair Konvensional	76
5.7 Keterbatasan Material Repair Konvensional.....	76
5.8 Parameter Material Repair Beton.....	76

Bab 6. Material Repair Beton Inovatif 83

6.1 Latar Belakang Material Repair Inovatif.....	83
6.2 Engineered Cementitious Composite (ECC) untuk Repair Beton.....	84
6.3 Geopolymer sebagai Material Repair Beton.....	86
6.4 Material Repair Rendah Karbon (Low Carbon Repair)	87
6.5 Kompatibilitas dan Desain Material Repair Inovatif	89
6.6 Aspek Keberlanjutan dan Life Cycle Assessment.....	89
6.7 Tantangan Implementasi di Lapangan	90
6.8 Parameter Kuantitatif ECC & Geopolimer	90

Bab 7. Teknologi Repair Retak Beton 95

7.1 Klasifikasi dan Karakteristik Retak Beton	95
7.2 Prinsip Dasar Repair Retak Beton.....	96
7.3 Teknologi Crack Injection	97
7.4 Routing and Sealing.....	98
7.5 Stitching dan Mechanical Crack Repair	99
7.6 Overlay dan Surface Treatment untuk Pengendalian Retak	99
7.7 Teknologi Self-Healing Concrete untuk Repair Retak.....	100
7.8 Evaluasi Keberhasilan Repair Retak Beton.....	101
7.9 Model Lebar Retak, Laju Korosi & Efektivitas Repair Beton	102

Bab 8. Teknologi Repair Beton Terkorosi	107
8.1 Mekanisme Korosi Tulangan dalam Beton	107
8.2 Prinsip Dasar Repair Beton Terkorosi.....	109
8.3 Patch Repair Konvensional.....	110
8.4 Penggunaan Corrosion Inhibitor	111
8.5 Cathodic Protection	111
8.6 Electrochemical Repair Techniques.....	113
8.7 Kombinasi Strategi Repair Beton Terkorosi.....	114
8.8 Evaluasi Kinerja dan Monitoring Pasca-Repair.....	114
8.9 Model Kuantitatif Repair Beton Terkorosi.....	114
Bab 9. Teknologi Repair Beton Akibat Degradasi Kimia dan Lingkungan Agresif.....	121
9.1 Jenis dan Mekanisme Degradasi Kimia Beton.....	121
9.2 Serangan Sulfat dan Teknologi Repair	122
9.3 Serangan Asam dan Lingkungan Industri	124
9.4 Alkali-Silica Reaction (ASR) dan Strategi Repair	124
9.5 Leaching dan Soft Water Attack	125
9.6 Biodeterioration dan Lingkungan Mikroba	125
9.7 Prinsip Desain Repair Beton pada Lingkungan Agresif	126
9.8 Evaluasi Kinerja dan Monitoring Pasca-Repair.....	127
9.9 Model Kuantitatif Repair Beton Akibat Degradasi Kimia & Lingkungan Agresif.....	128
Bab 10. Teknologi Repair Beton pada Lingkungan Laut dan Infrastruktur Khusus.....	133
10.1 Karakteristik Lingkungan Laut terhadap Beton.....	133
10.2 Mekanisme Kerusakan Beton di Lingkungan Laut	134
10.3 Prinsip Dasar Repair Beton di Lingkungan Laut	136
10.4 Patch Repair dan Recasting pada Struktur Laut	136
10.5 Proteksi Korosi pada Infrastruktur Laut	137
10.6 Coating, Lining, dan Surface Protection.....	139

10.7 Teknologi Repair Inovatif untuk Infrastruktur Laut	139
10.8 Monitoring dan Manajemen Aset Infrastruktur Laut.....	140

Bab 11. Pelaksanaan, Quality Control, dan

Evaluasi Kinerja Repair Beton..... 143

11.1 Prinsip Umum Pelaksanaan Repair Beton.....	143
11.2 Persiapan Permukaan Beton dan Tulangan	145
11.3 Aplikasi Material Repair dan Curing.....	146
11.4 Quality Control pada Pekerjaan Repair Beton.....	148
11.5 Pengendalian Mutu Berbasis Kinerja	149
11.6 Evaluasi Kinerja Pasca-Repair	149
11.7 Monitoring Jangka Panjang dan Manajemen Aset.....	151
11.8 Dokumentasi dan Evaluasi Kegagalan Repair.....	151
11.9 Pelaksanaan, Quality Control, dan Evaluasi Kinerja Repair Beton.....	152

Bab 12. Studi Kasus, Best Practice, dan Arah Masa Depan Teknologi Repair Beton 161

12.1 Peran Studi Kasus dalam Teknologi Repair Beton.....	161
12.2 Studi Kasus Repair Beton pada Infrastruktur Perkotaan	161
12.3 Studi Kasus Infrastruktur Laut dan Pesisir	162
12.4 Studi Kasus Lingkungan Industri dan Limbah	164
12.5 Best Practice dalam Teknologi Repair Beton.....	164
12.6 Peran Standar dan Regulasi Internasional.....	165
12.7 Digitalisasi dan Teknologi Cerdas dalam Repair Beton....	165
12.8 Material Repair Masa Depan dan Keberlanjutan	167
12.9 Tantangan dan Agenda Riset Mendatang.....	167
12.10 TanModel Kuantitatif LCC & CO ₂ saving pada Teknologi Repair Beton.....	168

Bab 13. Manajemen Risiko dan Keandalan dalam Repair

Beton.....	173
13.1 Konsep Risiko dan Reliability pada Struktur Beton	173
13.2 Probabilistic Deterioration Modeling.....	177
13.3 Reliability-Based Repair Planning.....	178
13.4 Analisis Ketidakpastian dalam Desain Repair	181
13.5 Risk-Based Inspection (RBI) dan Prioritisasi Repair	184
13.6 Model Keputusan Repair Berbasis Risiko dan Konsekuensi Kegagalan.....	185
13.7 Integrasi Risk Assessment dengan Digital Twin.....	187
13.8 Studi Numerik: Optimasi Waktu Repair	190
 Bab 14. Ekonomi Teknik, Life Cycle Cost Analysis (LCCA), dan Strategi Pembiayaan Repair	 195
14.1 Prinsip Ekonomi Teknik dalam Infrastruktur Beton	195
14.2 Life Cycle Cost Analysis (LCCA) pada Repair Beton.....	197
14.3 Analisis Cost-Benefit: Repair vs Strengthening vs Replacement.....	198
14.4 Model Optimasi Biaya-Kinerja-Risiko	199
14.5 Social Cost dan Environmental Cost dalam Repair	200
14.6 Carbon Pricing dan Implikasi terhadap Strategi Repair ...	201
14.7 Skema Pembiayaan Infrastruktur dan Public-Private Partnership	202
14.8 Model Pengambilan Keputusan Multi-Kriteria (MCDM)	203

**DAFTAR PUSTAKA
INDEKS ISTILAH**

Naskah Pengajuan ISBN

Naskah Pengajuan ISBN

BAB 1

PENDAHULUAN TEKNOLOGI REPAIR BETON

1.1. Latar Belakang dan Urgensi Repair Beton

Beton merupakan material konstruksi paling dominan dalam pembangunan infrastruktur modern, mulai dari bangunan gedung, jembatan, bendungan, pelabuhan, hingga infrastruktur strategis seperti fasilitas energi dan transportasi. Dominasi ini didorong oleh ketersediaan bahan baku yang melimpah, fleksibilitas dalam desain struktural, kemudahan pelaksanaan di lapangan, serta kinerja mekanik dan durabilitas yang relatif baik dibandingkan material konstruksi lainnya (Scrivener et al., 2021; Mehta and Monteiro 2014; Wang, J. et al., 2024).

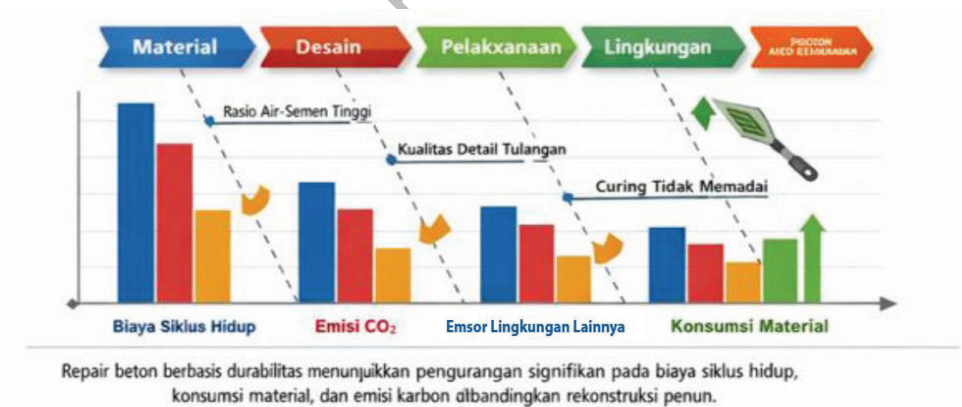
Namun, berbagai penelitian dan laporan internasional menunjukkan bahwa sejumlah besar struktur beton tidak mencapai umur rencana (*design service life*). Banyak struktur mengalami degradasi dini hanya dalam waktu 10–30 tahun, jauh lebih pendek dari umur rencana 50–100 tahun yang umumnya digunakan dalam desain (Neville, 2016; Zhang et al, 2025; Andrade, 2021). Degradasi dini ini disebabkan oleh kombinasi faktor mutu material, kesalahan desain, praktik pelaksanaan yang kurang terkendali, serta paparan lingkungan agresif yang semakin meningkat akibat perubahan iklim dan aktivitas industri.

Fenomena degradasi beton tidak hanya berdampak pada aspek teknis dan keselamatan struktur, tetapi juga menimbulkan konsekuensi ekonomi dan lingkungan yang signifikan. Kegagalan struktur atau penurunan kinerja yang cepat meningkatkan biaya pemeliharaan, mengganggu fungsi layanan infrastruktur, dan dalam kasus tertentu dapat menimbulkan risiko keselamatan publik. Oleh karena itu, pendekatan konvensional yang

mengandalkan pembongkaran dan rekonstruksi penuh semakin dipandang tidak efisien dan tidak berkelanjutan.

Dalam konteks tersebut, teknologi repair beton berkembang sebagai solusi strategis untuk mempertahankan dan memperpanjang umur layanan struktur beton eksisting. Repair beton memungkinkan pemulihan fungsi struktural dan durabilitas tanpa harus mengganti struktur secara keseluruhan. Dibandingkan rekonstruksi, repair beton terbukti lebih efisien secara ekonomi dan mampu menurunkan jejak karbon secara signifikan karena mengurangi konsumsi semen baru, agregat, dan energi konstruksi (Miller et al., 2021; Gálvez et al., 2022; EN 1504, 2020).

Sejalan dengan agenda global menuju konstruksi rendah karbon dan ekonomi sirkular, repair beton kini diposisikan sebagai komponen kunci dalam pengelolaan aset infrastruktur berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya menekankan perbaikan kerusakan yang telah terjadi, tetapi juga pencegahan degradasi lebih lanjut melalui strategi berbasis durabilitas dan kinerja jangka panjang.



Gambar 1.1. Perbandingan siklus hidup struktur beton antara rekonstruksi penuh dan repair beton berbasis durabilitas (diadaptasi dari ACI 562, 2021; fib Model Code 2020; dan Stewart, 2022).

Gambar 1.1 membandingkan dua pendekatan utama dalam pengelolaan struktur beton yang mengalami degradasi, yaitu rekonstruksi penuh dan repair beton berbasis durabilitas, dalam konteks siklus hidup struktur (*life cycle of concrete structures*). Gambar ini menegaskan bahwa pilihan strategi penanganan kerusakan sangat menentukan kinerja jangka panjang, biaya siklus hidup, dan dampak lingkungan dari suatu infrastruktur beton.

Pada pendekatan rekonstruksi penuh, struktur beton yang mengalami penurunan kinerja dibongkar dan digantikan dengan struktur baru. Meskipun metode ini mampu mengembalikan kapasitas struktur secara instan, rekonstruksi penuh memerlukan konsumsi material dan energi yang besar, waktu pelaksanaan yang lama, serta biaya awal yang tinggi. Selain itu, proses pembongkaran dan pembangunan ulang berkontribusi signifikan terhadap emisi CO₂, terutama akibat produksi semen dan aktivitas konstruksi. Dalam perspektif siklus hidup, pendekatan ini cenderung menghasilkan lonjakan biaya dan dampak lingkungan pada setiap siklus penggantian struktur.

Sebaliknya, pendekatan repair beton berbasis durabilitas menempatkan perbaikan sebagai bagian integral dari manajemen siklus hidup struktur. Intervensi repair dilakukan secara terencana pada tahap awal atau menengah degradasi, dengan tujuan memperlambat laju kerusakan, memulihkan kinerja struktur, dan memperpanjang umur layanan efektif. Repair berbasis durabilitas tidak hanya berfokus pada pemulihan kerusakan fisik, tetapi juga pada pengendalian mekanisme kerusakan dominan, seperti korosi tulangan, degradasi kimia, dan penetrasi zat agresif.

Penerapan repair yang tepat waktu dan berbasis durabilitas, kurva kinerja struktur dapat dinaikkan kembali dan dipertahankan di atas batas kinerja minimum untuk jangka waktu yang lebih panjang. Pendekatan ini menghasilkan distribusi biaya yang lebih merata sepanjang umur struktur, menghindari biaya besar yang

muncul secara tiba-tiba seperti pada rekonstruksi penuh. Selain itu, repair beton secara signifikan mengurangi kebutuhan material baru dan limbah konstruksi, sehingga menurunkan jejak karbon dan mendukung prinsip keberlanjutan.

Secara konseptual, pergeseran paradigma dari pendekatan reaktif dan berbasis penggantian menuju pendekatan proaktif dan berbasis durabilitas dalam pengelolaan infrastruktur beton. Pendekatan repair beton berbasis durabilitas, sebagaimana direkomendasikan dalam ACI 562 dan fib Model Code 2020, memungkinkan pengambilan keputusan teknis yang lebih rasional, ekonomis, dan berkelanjutan, khususnya dalam pengelolaan aset infrastruktur jangka panjang.

1.2. Posisi Repair Beton dalam Siklus Hidup Struktur

Siklus hidup struktur beton mencakup tahapan perencanaan, desain, konstruksi, operasi, pemeliharaan, perbaikan (repair), rehabilitasi, dan pembongkaran. Pendekatan modern dalam rekayasa struktur menempatkan repair beton sebagai bagian integral dari *life-cycle management*, bukan sekadar tindakan reaktif setelah terjadi kerusakan serius (ACI 562, 2021; ISO 13823, 2020; fib Model Code, 2020).

Konsep ini sejalan dengan filosofi *durability design* dan *service life planning*, di mana struktur dirancang, dioperasikan, dan dipelihara untuk mencapai umur layanan tertentu dengan tingkat risiko yang dapat diterima. Dalam kerangka ini, repair beton berfungsi sebagai intervensi teknis pada fase operasi untuk:

- Mengendalikan laju degradasi
- Memulihkan kinerja struktural dan fungsional
- Memperpanjang umur layanan struktur

Studi mutakhir menunjukkan bahwa strategi repair berbasis durabilitas mampu memperpanjang umur layanan struktur hingga dua kali lipat dibandingkan pendekatan konvensional, dengan biaya siklus hidup yang lebih rendah dan dampak lingkungan yang lebih kecil (Li, 2023,2024; Xu et al., 2024; Pacheco and Torgal, 2023).

Tabel 1.1. Posisi Repair Beton dalam Siklus Hidup Struktur Beton (diadaptasi dari ACI 562, 2021; fib Model Code 2020; dan Stewart, 2022).

Tahap siklus hidup struktur beton	Aktivitas Utama	Peran Teknologi Repair Beton
Perencanaan dan desain	Penentuan umur rencana	Integrasi konsep durabilitas dan repair preventif
Konstruksi	Produksi dan pelaksanaan beton	Pencegahan cacat dini
Operasi awal	Pemanfaatan struktur	Inspeksi awal baseline condition
Operasi jangka panjang	Pemanfaatan struktur	Repair preventif dan korektif
Degradasi	Beban layanan dan Pengaruh lingkungan	Repair Struktural dan repair berbasis durabilitas
Evaluasi Umur layanan	Evaluasi umur layanan	Penentuan repair lanjutan dan rekonstruksi

Tabel 1.1 menyajikan posisi repair beton sebagai bagian integral dari siklus hidup struktur beton, yang mencakup tahap perencanaan, konstruksi, operasi, pemeliharaan, perbaikan (repair), rehabilitasi, hingga akhir umur layanan struktur. Tabel ini menegaskan bahwa repair beton bukan merupakan tindakan reaktif yang berdiri sendiri, melainkan intervensi teknis yang terencana dalam kerangka *life-cycle management*.

Pada tahap perencanaan dan konstruksi, fokus utama adalah pemenuhan persyaratan desain struktural dan durabilitas awal. Namun, seiring berjalannya waktu pada fase operasi, struktur beton mulai mengalami degradasi akibat beban layanan dan pengaruh lingkungan. Tabel 1.1 menunjukkan bahwa repair beton menjadi relevan ketika hasil inspeksi dan diagnosis mengindikasikan penurunan kinerja yang belum mencapai tingkat kegagalan, sehingga intervensi masih dapat dilakukan secara efektif.

Melalui penerapan repair beton yang tepat waktu, kinerja struktur dapat dipulihkan dan laju degradasi dapat dikendalikan, sehingga umur layanan efektif struktur diperpanjang. Tabel ini juga menegaskan bahwa repair beton berfungsi sebagai jembatan antara pemeliharaan rutin dan rehabilitasi atau rekonstruksi, dengan tujuan menghindari biaya besar dan gangguan operasional yang ditimbulkan oleh pembongkaran total.

Selain aspek teknis, implikasi ekonomi dan lingkungan dari posisi repair beton dalam siklus hidup struktur beton. Repair yang direncanakan secara strategis menghasilkan distribusi biaya siklus hidup yang lebih efisien dan menurunkan emisi karbon melalui pengurangan kebutuhan material baru dan limbah konstruksi. Dengan demikian, mendukung pergeseran paradigma menuju pengelolaan infrastruktur beton yang berbasis durabilitas, kinerja, dan keberlanjutan.

1.3. Definisi dan Terminologi Repair Beton

Dalam literatur teknik dan standar internasional, istilah repair, rehabilitation, dan strengthening (*retrofitting*) sering digunakan secara bergantian, meskipun ketiganya memiliki makna teknis yang berbeda. Standar EN 1504 dan ACI Committee 562 memberikan klasifikasi yang jelas berdasarkan tujuan dan tingkat

intervensi struktural (Bertolini et al 2020, Beushausen et al. 2023; Alexander et al 2024; Chen, H., et al, 2024).

- **Repair** adalah tindakan untuk memperbaiki kerusakan lokal dan mengembalikan fungsi awal struktur.
- **Rehabilitation** mencakup perbaikan menyeluruh untuk meningkatkan kinerja dan durabilitas struktur secara keseluruhan.
- **Strengthening/Retrofitting** bertujuan meningkatkan kapasitas struktur agar mampu menahan beban yang lebih besar atau memenuhi persyaratan desain baru.

Kejelasan terminologi ini sangat penting karena berimplikasi langsung pada pemilihan material repair, metode pelaksanaan, serta kriteria evaluasi kinerja pasca-repair. Kesalahan dalam memahami terminologi sering menyebabkan ketidaksesuaian antara tujuan perbaikan dan solusi teknis yang diterapkan.

Tabel 1.2. Perbandingan Terminologi Repair, Rehabilitation, dan Strengthening Beton (disarikan dari EN 1504, 2020 dan ACI 562, 2021).

Aspek	Repair	Rehabilitation	Strengthening/retrofitting
Tujuan Utama	Mengembalikan fungsi awal	Meningkatkan kinerja dan Durabilitas	
Skala intervensi	Lokal	Menyeluruh	Struktural
Dampak terhadap desain awal	Minimal	moderat	Signifikan
Contoh aplikasi	Perbaikan retak/spalling	Perbaikan menyeluruh selimut beton, Penambahan FRP	
Skala rujukan	EN 1504, ACI 562	EN 1504	ACI 440, ACI 562

Tabel 1.2 menyajikan perbandingan terminologi repair, rehabilitation, dan strengthening dalam konteks penanganan struktur beton eksisting, sebagaimana didefinisikan dalam standar internasional EN 1504 dan ACI 562. Tabel ini bertujuan untuk memperjelas perbedaan konsep, tujuan, dan tingkat intervensi dari masing-masing istilah, karena kesalahpahaman terminologi sering berujung pada pemilihan strategi perbaikan yang tidak tepat.

Repair didefinisikan sebagai tindakan perbaikan yang bersifat lokal dan spesifik, dengan tujuan utama mengembalikan fungsi awal struktur atau elemen beton yang mengalami kerusakan. Repair umumnya diterapkan pada kerusakan yang belum berdampak signifikan terhadap kapasitas struktur secara keseluruhan, seperti retak non-struktural, spalling lokal, atau degradasi permukaan. Fokus utama repair adalah pemulihan kinerja dan durabilitas tanpa mengubah kapasitas desain awal struktur.

Rehabilitation memiliki cakupan yang lebih luas dibandingkan repair dan bertujuan untuk meningkatkan kembali kinerja struktur secara menyeluruh. Tindakan rehabilitasi biasanya melibatkan kombinasi perbaikan lokal, peningkatan durabilitas, serta perlindungan terhadap mekanisme kerusakan lanjutan, seperti korosi tulangan atau degradasi kimia. Rehabilitation sering diterapkan pada struktur yang telah mengalami penurunan kinerja signifikan, namun masih layak untuk dipertahankan melalui intervensi teknis yang terencana.

Strengthening atau *retrofitting* merupakan intervensi struktural yang bertujuan meningkatkan kapasitas struktur agar mampu menahan beban yang lebih besar atau memenuhi persyaratan desain baru, misalnya akibat perubahan fungsi bangunan, pembaruan standar desain, atau peningkatan beban gempa. Tindakan strengthening tidak hanya memulihkan kinerja, tetapi juga meningkatkan kapasitas struktural melebihi kondisi awal, dan

umumnya melibatkan penambahan elemen struktural atau material penguat.

Melalui Tabel 1.2, ditegaskan bahwa ketiga terminologi tersebut memiliki tujuan, skala intervensi, dan implikasi desain yang berbeda, meskipun dalam praktik sering diterapkan secara kombinatif. Pemahaman yang tepat terhadap perbedaan terminologi ini sangat penting dalam perencanaan teknologi repair beton, karena berpengaruh langsung terhadap pemilihan material, metode pelaksanaan, biaya siklus hidup, serta evaluasi kinerja pasca-intervensi.

Kegagalan dini struktur beton umumnya disebabkan oleh kombinasi faktor material, desain, pelaksanaan, dan lingkungan. Rasio air-semen berlebih, curing yang tidak memadai, serta detailing tulangan yang buruk merupakan faktor dominan yang sering dilaporkan dalam studi kegagalan struktur beton (Christodoulou et al. 2021; Courard et al. 2021, 2024)

Selain itu, paparan lingkungan agresif seperti klorida, karbonasi, dan sulfat mempercepat korosi tulangan dan degradasi matriks beton, khususnya pada lingkungan laut, industri, dan daerah tropis. Penelitian terbaru juga menyoroti peran biodeterioration dan aktivitas mikroba dalam mempercepat kerusakan beton pada kondisi kelembapan tinggi (Cusson, D., De Belie et al. 2022, De Muynck et al. 2020)



Gambar 1.2. Faktor penyebab kegagalan dini struktur beton yang melibatkan interaksi antara faktor material, desain, pelaksanaan, dan lingkungan (diadaptasi dari Angst et al. 2020, Bentz et al. 2020, Santhanam et al. 2021, dan De Belie et al. 2022).

Gambar 1.2 menggambarkan posisi teknologi repair beton dalam siklus hidup struktur beton, yang mencakup tahap perencanaan, konstruksi, operasi, pemeliharaan, perbaikan (*repair*), hingga akhir umur layanan. Gambar ini menegaskan bahwa repair beton bukan merupakan tindakan insidental, melainkan bagian integral dari manajemen siklus hidup struktur (*life-cycle management*).

Pada fase operasi, struktur beton mulai mengalami degradasi akibat beban layanan dan pengaruh lingkungan. Apabila kerusakan teridentifikasi sejak dini, intervensi *repair* yang tepat dapat dilakukan untuk memperlambat laju degradasi dan mengembalikan kinerja struktur mendekati kondisi awal. Dengan demikian, repair beton berperan sebagai mekanisme pengendalian kerusakan yang menjembatani fase operasi dan pemeliharaan menuju umur layanan yang lebih panjang.

Penerapan repair beton secara strategis mampu menunda atau menghindari kebutuhan rekonstruksi, sehingga menurunkan biaya siklus hidup dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, repair beton diposisikan sebagai elemen kunci dalam pendekatan desain berkelanjutan dan pengelolaan aset infrastruktur beton jangka panjang.

1.4. Penyebab Umum Kegagalan Dini Beton

Kegagalan dini pada struktur beton merupakan salah satu permasalahan utama dalam bidang rekayasa infrastruktur modern. Secara umum, kegagalan tersebut tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan oleh kombinasi kompleks antara mutu material, kesalahan perencanaan desain, kualitas pelaksanaan konstruksi, serta pengaruh lingkungan selama masa layanan struktur. Interaksi dari berbagai faktor tersebut dapat menurunkan kinerja mekanik maupun durabilitas beton secara signifikan, sehingga umur layanan struktur menjadi jauh lebih pendek dari yang direncanakan. Berbagai studi kegagalan struktur beton menunjukkan bahwa sebagian besar kasus kegagalan dini terjadi pada fase awal masa layanan, yaitu dalam rentang 5–20 tahun setelah konstruksi, yang menunjukkan adanya kelemahan dalam proses desain, pemilihan material, maupun pengendalian mutu selama konstruksi.

Salah satu faktor paling dominan dalam kegagalan dini beton adalah kualitas campuran beton, khususnya rasio air–semen (water–cement ratio). Rasio air–semen yang terlalu tinggi meningkatkan porositas kapiler dalam matriks beton, sehingga mempercepat penetrasi air, ion klorida, dan gas karbon dioksida ke dalam struktur beton. Porositas yang tinggi tidak hanya menurunkan kuat tekan beton, tetapi juga meningkatkan permeabilitas yang menjadi jalur masuk berbagai agen agresif dari lingkungan. Selain itu, penggunaan agregat yang tidak memenuhi

spesifikasi, distribusi ukuran agregat yang tidak optimal, serta penggunaan bahan tambahan yang tidak terkontrol juga dapat menyebabkan heterogenitas mikrostruktur beton yang akhirnya mempercepat proses degradasi material.

Faktor lain yang sering berkontribusi terhadap kegagalan dini adalah proses curing yang tidak memadai. Curing memiliki peran penting dalam memastikan proses hidrasi semen berlangsung secara optimal sehingga terbentuk mikrostruktur kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang padat dan stabil. Ketika curing tidak dilakukan dengan baik—misalnya karena penguapan air yang terlalu cepat akibat suhu tinggi atau angin kencang—reaksi hidrasi semen menjadi tidak sempurna. Akibatnya, terbentuk mikroretak awal (early microcracking) dan struktur pori yang lebih terbuka, yang pada akhirnya menurunkan kekuatan dan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif.

Selain faktor material dan proses curing, kesalahan dalam desain struktural dan detailing tulangan juga menjadi penyebab penting kegagalan dini beton. Detailing tulangan yang tidak memadai, seperti jarak tulangan yang terlalu rapat atau terlalu jarang, penutup beton (cover) yang tidak cukup, serta penempatan tulangan yang tidak sesuai dengan desain, dapat menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata pada elemen struktur. Penutup beton yang terlalu tipis, misalnya, akan mempercepat penetrasi klorida atau karbonasi menuju tulangan baja sehingga meningkatkan risiko korosi. Sebaliknya, kesalahan dalam analisis beban dan kombinasi beban juga dapat menyebabkan elemen struktur bekerja di luar kapasitas desainnya, sehingga retak struktural berkembang lebih cepat dari yang diperkirakan.

Pengaruh lingkungan agresif merupakan faktor eksternal yang sangat signifikan dalam mempercepat degradasi beton. Pada lingkungan laut atau daerah pesisir, penetrasi ion klorida merupakan penyebab utama korosi tulangan. Ion klorida mampu

menembus lapisan pasif yang melindungi baja tulangan sehingga memicu reaksi elektrokimia yang menghasilkan produk korosi. Produk korosi tersebut memiliki volume yang lebih besar dibandingkan baja asli, sehingga menimbulkan tekanan internal yang menyebabkan retak dan delaminasi pada selimut beton. Selain itu, proses karbonasi akibat difusi karbon dioksida dari atmosfer juga dapat menurunkan pH beton secara bertahap. Penurunan pH ini menghilangkan lapisan pasif pada baja tulangan, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap korosi.

Di samping klorida dan karbonasi, serangan sulfat juga merupakan mekanisme degradasi penting yang sering terjadi pada lingkungan tanah atau air yang mengandung ion sulfat tinggi. Reaksi antara ion sulfat dan produk hidrasi semen dapat menghasilkan mineral ekspansif seperti ettringite sekunder dan gypsum. Pembentukan mineral ekspansif tersebut menyebabkan peningkatan volume internal dalam matriks beton yang pada akhirnya menghasilkan retak dan kehilangan integritas struktural. Dalam jangka panjang, proses ini dapat mengakibatkan pelunakan matriks beton dan penurunan kekuatan mekanik secara signifikan.

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa faktor biologis memainkan peran yang semakin penting dalam degradasi beton, terutama pada lingkungan dengan kelembapan tinggi seperti sistem saluran limbah, pelabuhan, dan fasilitas pengolahan air. Fenomena ini dikenal sebagai biodeterioration, yaitu kerusakan material akibat aktivitas mikroorganisme. Beberapa jenis bakteri, seperti bakteri pengoksidasi sulfur, dapat menghasilkan asam sulfat yang sangat korosif terhadap matriks beton. Asam ini bereaksi dengan kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat dalam beton, menghasilkan senyawa yang lebih mudah larut sehingga mempercepat proses pelapukan material. Selain bakteri, pertumbuhan alga dan jamur pada permukaan beton juga dapat meningkatkan retensi kelembapan dan mempercepat proses degradasi kimia.

Selain faktor-faktor tersebut, retak awal akibat penyusutan plastis dan penyusutan kering juga berkontribusi terhadap kegagalan dini beton. Retak mikro yang terbentuk pada tahap awal pengerasan beton dapat berfungsi sebagai jalur masuk bagi air dan agen agresif. Seiring waktu, retak tersebut dapat berkembang menjadi retak makro yang mengurangi kapasitas struktural elemen beton. Dalam banyak kasus kegagalan infrastruktur, retak awal ini sering diabaikan pada tahap inspeksi awal, padahal retak tersebut merupakan indikator awal potensi degradasi jangka panjang.

Dengan mempertimbangkan berbagai mekanisme tersebut, dapat disimpulkan bahwa kegagalan dini beton merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor internal material dan faktor eksternal lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan modern dalam rekayasa beton tidak hanya berfokus pada peningkatan kuat tekan, tetapi juga pada peningkatan durabilitas, pengendalian permeabilitas, serta desain berbasis kinerja (performance-based design). Strategi seperti penggunaan material pozzolan, bahan tambah mineral, teknologi beton densifikasi, serta sistem monitoring kesehatan struktur (structural health monitoring) menjadi semakin penting untuk memastikan bahwa struktur beton mampu mencapai umur layanan yang direncanakan.

1.5. Dampak Ekonomi dan Lingkungan dari Kerusakan Beton

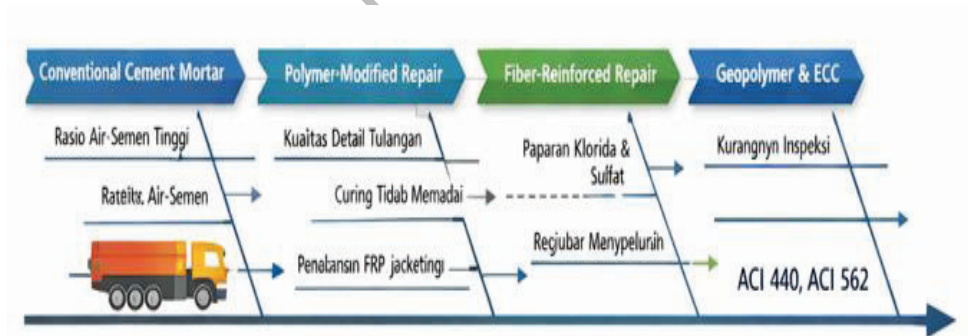
Kerusakan beton menimbulkan dampak ekonomi yang signifikan. Laporan internasional menunjukkan bahwa biaya pemeliharaan dan repair infrastruktur beton dapat mencapai lebih dari 40% total biaya siklus hidup struktur (Emmons, P.H., Vaysburd, A.M, 2020; EN 1504, 2020). Selain itu, pembongkaran dan rekonstruksi beton berkontribusi besar terhadap emisi CO₂ global, terutama akibat produksi semen Portland.

Pendekatan repair beton yang tepat terbukti mampu menekan biaya siklus hidup dan emisi karbon secara signifikan. Oleh karena itu, repair beton kini dipandang sebagai strategi mitigasi emisi dalam sektor konstruksi dan selaras dengan prinsip ekonomi sirkular (EN 206, 2020; fib Bulletin 34, 2020; fib Bulletin 90, 2021).

1.6. Evolusi Teknologi Repair Beton

Teknologi repair beton telah mengalami perkembangan pesat, dari pendekatan konvensional berbasis mortar semen sederhana menuju sistem repair berbasis material berkinerja tinggi, material berserat, polimer, serta material rendah karbon seperti geopolimer dan engineered cementitious composites (ECC) (fib Model Code 2020; Fournier, B et al 2023; Gálvez, J.C et al 2022).

Selain inovasi material, kemajuan signifikan juga terjadi pada metode diagnosis kerusakan, teknik pelaksanaan repair, dan sistem monitoring pasca-repair. Integrasi BIM, sensor pintar, dan kecerdasan buatan mulai diterapkan untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi repair beton modern.



Gambar 1.3. Evolusi teknologi repair beton dari pendekatan konvensional menuju material inovatif, rendah karbon, dan sistem berbasis teknologi cerdas (diadaptasi dari Gartner & Scrivener, 2021; Li et al. 2024, dan Xu et al. 2024)

Gambar 1.3 menggambarkan hubungan sebab-akibat antara kerusakan beton, penurunan kinerja struktur, peningkatan biaya siklus hidup, dan dampak lingkungan. Kerusakan beton yang tidak ditangani sejak dini menyebabkan penurunan bertahap kapasitas struktural dan durabilitas, sehingga meningkatkan frekuensi perbaikan, risiko kegagalan, dan biaya pemeliharaan dalam jangka panjang.

Selain aspek teknis dan ekonomi, Gambar 1.3 juga menegaskan bahwa kerusakan beton memiliki implikasi lingkungan yang signifikan. Pembongkaran dan rekonstruksi struktur beton membutuhkan konsumsi material dan energi yang besar, serta berkontribusi terhadap emisi CO₂ dari produksi semen dan aktivitas konstruksi. Semakin parah tingkat kerusakan, semakin besar pula jejak karbon yang dihasilkan.

Dengan menampilkan keterkaitan antara kinerja struktur, biaya, dan lingkungan, Gambar 1.3 menegaskan pentingnya pendekatan repair beton yang tepat waktu dan berbasis durabilitas. Repair yang direncanakan secara strategis mampu memutus siklus penurunan kinerja, menekan biaya siklus hidup, dan mengurangi dampak lingkungan, sehingga mendukung prinsip keberlanjutan dalam pengelolaan infrastruktur beton

1.7. Ruang Lingkup

Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman menyeluruh mengenai teknologi repair beton dari aspek teoritis hingga aplikatif. Pembahasan disusun secara sistematis mulai dari mekanisme kerusakan hingga penerapan teknologi repair pada berbagai kondisi lingkungan dan jenis infrastruktur.

Pendekatan penulisan menggabungkan teori, standar internasional, hasil riset mutakhir, serta studi kasus praktis sehingga buku ini dapat digunakan sebagai buku referensi.



Gambar 1.4. Kerangka konseptual teknologi repair beton dari mekanisme kerusakan menuju infrastruktur berkelanjutan berbasis kinerja (disarikan dari Emmons & Vaysburd, 2020; Van Breugel et al. 2021, dan fib Model Code 2020).

Gambar 1.4 menggambarkan evolusi teknologi repair beton dari pendekatan konvensional menuju sistem repair modern yang berorientasi pada kinerja, durabilitas, dan keberlanjutan. Pada tahap awal, teknologi repair beton didominasi oleh penggunaan mortar semen konvensional yang berfokus pada pemulihan bentuk fisik tanpa mempertimbangkan kompatibilitas material dan mekanisme kerusakan jangka panjang. Pendekatan ini sering menghasilkan perbaikan yang bersifat sementara dan rentan terhadap kegagalan ulang.

Seiring berkembangnya pemahaman terhadap mekanisme kerusakan beton, teknologi repair berevolusi menuju penggunaan material berkinerja tinggi, seperti mortar polimer, beton berserat, dan sistem perlindungan korosi. Pada tahap ini, konsep kompatibilitas mekanik, fisik, dan kimia antara beton eksisting dan material repair mulai menjadi perhatian utama dalam perancangan perbaikan.

Tahap evolusi terbaru menekankan penggunaan material inovatif dan rendah karbon, seperti engineered cementitious composites (ECC), geopolimer, dan material berbasis limbah industri, serta integrasi teknologi digital. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan memulihkan kinerja struktur, tetapi juga memperpanjang umur layanan secara signifikan, menurunkan biaya siklus hidup, dan mengurangi dampak lingkungan. Dengan demikian, Gambar 1.4 menegaskan pergeseran paradigma teknologi repair beton dari solusi reaktif menuju manajemen aset infrastruktur yang berkelanjutan dan berbasis kinerja.

1.8. Model Kuantitatif Degradasi Beton dan Kebutuhan Repair

1.8.1 Konsep Dasar Laju Degradasi Beton

Secara kuantitatif, degradasi beton dapat direpresentasikan sebagai penurunan kinerja terhadap waktu, misalnya kuat tekan, durabilitas, atau kapasitas struktural.

Model sederhana yang banyak digunakan:

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-kt} \quad (1-1)$$

di mana :

- $P(t)$ = parameter kinerja beton pada waktu t
- P_0 = kinerja awal beton
- K = Konstanta degradasi (tahun^{-1})
- t = Waktu layan (tahun)

Inteprestasi Teknik : Nilai K kecil = beton Tahan lama); Nilai K besar = Beton cepat rusak. **Repair beton bertujuan menurunkan nilai K secara signifikan.**

1.8.2 Contoh Numerik- Penurunan kinerja Beton

Misalkan: kinerja awal beton = 100; Konstanta degradasi $K = 0.03$ tahun⁻¹, maka setelah 20 tahun:

$$P(20) = 100 \cdot e^{-0,03 \cdot 20} = 54,9\%$$

- Beton Kehilangan ± 45 % kinerja, meskipun belum runtuh.
- Pada tahap ini repair lebih rasional dibandingkan rekonstruksi

1.9. Model Kuantitatif Siklus Hidup: Repair VS Rekonstruksi

1.9.1 Life Cicle Cost (LCC) dasar

Total biaya siklus hidup

$$LCC = C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^t} \quad (1-2)$$

di mana:

- C_0 = biaya awal (konstruksi / repair)
- C_i = biaya repair / pemeliharaan ke- i
- r = *discount rate*
- t = waktu (tahun)

1.9.2 Contoh Perbandingan kuantitatif

Untuk memahami implikasi ekonomi dari strategi pengelolaan struktur beton, dilakukan perbandingan sederhana antara dua pendekatan utama dalam manajemen infrastruktur, yaitu rekonstruksi penuh (full reconstruction) dan repair berbasis durabilitas (durability-based repair). Perbandingan ini dilakukan dalam kerangka life cycle cost (LCC) selama periode analisis 40 tahun.

Pada pendekatan rekonstruksi penuh, struktur yang mengalami degradasi signifikan dibongkar dan digantikan dengan konstruksi baru. Strategi ini umumnya membutuhkan biaya awal yang sangat besar, karena mencakup biaya pembongkaran struktur lama, pengadaan material baru, serta biaya konstruksi ulang. Dalam banyak kasus, rekonstruksi juga menimbulkan biaya tidak langsung seperti gangguan operasional, downtime layanan infrastruktur, serta dampak lingkungan akibat konsumsi material dan energi yang tinggi.

Sebaliknya, pendekatan repair berbasis durabilitas berfokus pada intervensi perbaikan yang dilakukan secara terencana sepanjang masa layanan struktur. Intervensi ini dapat berupa repair lokal, perlindungan tulangan, peningkatan ketahanan permukaan beton, atau penggunaan material repair berkinerja tinggi yang mampu memperlambat laju degradasi. Dengan strategi ini, biaya awal yang diperlukan umumnya hanya sekitar 30% dari biaya rekonstruksi penuh, karena sebagian besar struktur eksisting tetap dipertahankan dan hanya bagian yang mengalami degradasi yang diperbaiki.

Selain biaya awal yang lebih rendah, pendekatan repair juga menghasilkan distribusi biaya yang lebih merata sepanjang umur layanan struktur. Biaya pemeliharaan dan repair dilakukan secara berkala dalam skala yang relatif kecil dibandingkan dengan biaya besar yang diperlukan untuk rekonstruksi total. Dengan demikian, jika dianalisis dalam perspektif siklus hidup selama 40 tahun, total biaya yang dikeluarkan melalui strategi repair berbasis durabilitas umumnya berada pada kisaran 55–65% dari biaya rekonstruksi penuh.

Perbandingan kuantitatif tersebut dapat diringkas sebagai berikut.

Strategi	Biaya Awal	Repair Berkala	LCC 40 Tahun
Rekonstruksi penuh	100%	minimal	100%
Repair berbasis durabilitas	±30%	periodik	55–65%

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa pendekatan repair mampu memberikan penghematan biaya siklus hidup sebesar sekitar 35–45% dibandingkan dengan strategi rekonstruksi penuh. Penghematan tersebut berasal dari beberapa faktor utama, antara lain:

1. Pengurangan kebutuhan material baru, karena sebagian besar struktur eksisting tetap digunakan.
2. Penurunan biaya konstruksi dan logistik, karena intervensi repair biasanya bersifat lokal dan tidak memerlukan pembongkaran total.
3. Pengurangan downtime operasional, terutama pada infrastruktur penting seperti jembatan, pelabuhan, atau fasilitas industri.
4. Efisiensi distribusi biaya sepanjang waktu, sehingga tidak terjadi lonjakan biaya besar pada satu periode tertentu.

Temuan ini konsisten dengan berbagai studi internasional mengenai manajemen aset infrastruktur beton. Standar **American Concrete Institute (ACI) dalam dokumen ACI 562 Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures menekankan bahwa repair yang dilakukan pada tahap degradasi awal dapat secara signifikan memperpanjang umur layanan struktur dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan rekonstruksi.

Demikian pula, fib Model Code for Concrete Structures 2020 merekomendasikan pendekatan life-cycle management yang mengintegrasikan strategi inspeksi, pemeliharaan, dan repair berbasis durabilitas untuk meminimalkan biaya total selama masa layanan infrastruktur.

Dengan demikian, dari perspektif ekonomi, strategi repair tidak hanya merupakan solusi teknis untuk memperbaiki kerusakan beton, tetapi juga merupakan pendekatan manajemen aset yang lebih efisien dan berkelanjutan. Pendekatan ini memungkinkan pemilik infrastruktur untuk mempertahankan kinerja struktur dalam jangka panjang dengan biaya yang lebih rendah, sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan material konstruksi baru.

1.10. Model Emisi Karbon: Repair sebagai Strategi Dekarbonisasi

1.10.1 Emisi CO₂ dapat diperkirakan:

$$CO_2 = m_{cement} \cdot EF_{cement} \quad (1-3)$$

dengan

- $EF_{cement} \approx 0,85 \text{ kg CO}_2 / \text{kg semen}$

1.10.2 Contoh Kuantitatif

Opsi	Volume Beton	Semen	Emisi CO ₂
Rekonstruksi	1 m ³	350 kg	297kg
Repair lokal	0.3 m ³	120 kg	102

Reduksi emisi =65%, Repair beton = aksi mitigasi karbon nyata

1.11. Model Keputusan Repair Berbasis Ambang Kinerja

1.11.1 Threshold-Based Decision Model

Menurut pendekatan ACI dan fib:

$$\text{Jika } \frac{P(t)}{p_o} < 0,7 \Rightarrow \text{Repair diperlukan} \quad \rightarrow \quad (1-4)$$

Rasio kerja	Tindakan
>0.85	Monitoring
0.7- 0.85	Preventif repair
<0.7	Structural repair
<0.4	Rehabilitasi/penguatan

BAB 2

MEKANISME KERUSAKAN BETON

Bab ini membahas mekanisme fundamental yang menyebabkan degradasi dan kerusakan pada struktur beton. Pemahaman yang tepat terhadap mekanisme kerusakan merupakan fondasi utama dalam pemilihan strategi repair beton yang efektif, kompatibel, dan berkelanjutan. Kerusakan beton pada praktik lapangan umumnya bersifat multimekanisme, di mana satu jenis kerusakan dapat memicu atau mempercepat mekanisme kerusakan lainnya. Oleh karena itu, pendekatan diagnosis dan repair beton modern harus mempertimbangkan interaksi antar mekanisme kerusakan, kondisi lingkungan, serta riwayat struktur secara menyeluruh.

2.1. Retak Beton: Shrinkage, Thermal, dan Structural Cracking

Retak merupakan manifestasi kerusakan paling umum pada beton dan sering menjadi indikator awal terjadinya degradasi durabilitas. Retak tidak selalu bersifat struktural, namun keberadaannya dapat menjadi jalur masuk utama air, oksigen, klorida, dan zat agresif lainnya, yang pada akhirnya mempercepat mekanisme kerusakan lanjutan seperti korosi tulangan dan degradasi kimia.

2.1.1 Shrinkage Cracking

Shrinkage cracking terjadi akibat penyusutan volume beton, baik pada tahap awal (plastic shrinkage) maupun setelah beton mengeras (drying shrinkage). Faktor dominan yang mempengaruhi shrinkage meliputi rasio air-semen, jenis agregat, kondisi curing, serta lingkungan suhu dan kelembapan (Bentz, D.P., et al 2020; Schindler, A.K., et al 2021; Hooton, R.D., 2022). Retak shrinkage umumnya memiliki lebar kecil ($<0,3$ mm) namun menyebar secara acak dan luas.

2.1.2 Thermal Cracking

Thermal cracking umum terjadi pada elemen beton masif akibat perbedaan suhu internal dan eksternal selama proses hidrasi semen. Gradien suhu yang tinggi menghasilkan tegangan tarik internal yang melebihi kuat tarik beton umut awal. Retak termal sering bersifat tembus dan berpotensi menurunkan durabilitas jangka panjang struktur.

2.1.3 Structural Cracking

Structural cracking disebabkan oleh beban yang melebihi kapasitas desain, kesalahan detailing tulangan, atau perubahan fungsi struktur. Retak jenis ini memiliki implikasi langsung terhadap keselamatan struktur dan memerlukan evaluasi struktural sebelum dilakukan repair (Angst, U., et al., 2020; Andrade, C., 2021).

Tabel 2.1. Klasifikasi retak beton dan implikasinya terhadap strategi repair (disarikan dari ACI 224R 2021, Bentz et al. 2020, dan Gálvez et al. 2022).

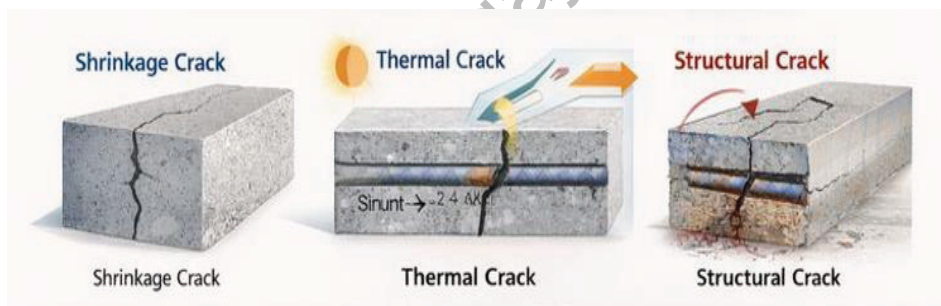
Jenis retak	Penyebab utama	Karakteristik	Implikasi terhadap repair
Shrinkage crack	Penyusutan beton	Retak acak, lebar	Crack sealing, coating
Thermal crack	Gradient suhu	Retak relatif besar	Injection + kompatibilitas thermal
Structural cracking	Beban berlebih	Retak lebar	Injection + strengthening

Tabel 2.1 merangkum mekanisme kerusakan utama pada beton, termasuk retak akibat susut, temperatur, dan beban struktural, korosi tulangan, degradasi kimia, degradasi fisik, serta biodeterioration. Tabel ini menunjukkan bahwa kerusakan beton

umumnya bersifat multimekanisme, di mana satu jenis kerusakan dapat memicu atau mempercepat mekanisme kerusakan lainnya.

Setiap mekanisme kerusakan memiliki indikator lapangan yang khas, seperti pola dan lebar retak, spalling, perubahan warna, atau pelunakan permukaan beton. Indikator-indikator ini menjadi dasar penting dalam tahap inspeksi dan diagnosis untuk mengidentifikasi mekanisme dominan yang bertanggung jawab terhadap penurunan kinerja struktur.

Melalui Tabel 2.1, ditegaskan bahwa pemahaman mekanisme kerusakan beton merupakan prasyarat utama dalam pemilihan strategi repair yang efektif. Dengan mengaitkan jenis kerusakan dengan dampak struktural dan durabilitas, tabel ini berfungsi sebagai landasan konseptual yang menghubungkan kajian mekanisme kerusakan (Bab 2) dengan tahap inspeksi, diagnosis, dan perancangan repair beton pada bab-bab selanjutnya.



Gambar 2.1. Klasifikasi retak beton berdasarkan mekanisme shrinkage, thermal, dan structural cracking (disarikan dari ACI 224R 2021, Bentz et al. 2020, dan Gálvez et al. 2022).

Gambar 2.1 menggambarkan berbagai mekanisme terjadinya retak pada beton, yang meliputi retak akibat susut (*shrinkage cracking*), retak akibat perubahan temperatur (*thermal cracking*), dan retak akibat beban struktural (*structural cracking*). Retak-retak ini merupakan bentuk kerusakan awal yang paling umum dijumpai

pada struktur beton dan sering berperan sebagai pemicu mekanisme kerusakan lanjutan.

Retak susut terjadi akibat penyusutan volume beton selama proses hidrasi dan pengeringan, terutama apabila pergerakan beton terhambat atau curing tidak memadai. Retak temperatur umumnya terjadi pada beton masif akibat perbedaan suhu antara bagian dalam dan permukaan beton, yang menimbulkan tegangan tarik termal melebihi kapasitas tarik beton. Sementara itu, retak struktural terjadi ketika tegangan akibat beban kerja atau beban berlebih melampaui kapasitas beton, dan biasanya mengikuti arah tulangan atau zona tarik elemen struktur.

Gambar 2.1 menegaskan bahwa meskipun retak tidak selalu langsung menyebabkan kegagalan struktur, keberadaan retak berfungsi sebagai jalur masuk air, ion klorida, karbon dioksida, dan zat agresif lainnya ke dalam beton. Hal ini mempercepat degradasi durabilitas dan meningkatkan risiko korosi tulangan serta kerusakan jangka panjang. Oleh karena itu, pemahaman jenis dan mekanisme retak beton menjadi dasar penting dalam tahap inspeksi, diagnosis, serta pemilihan strategi repair beton yang tepat.

2.2. Korosi Tulangan dan Interaksi Baja-Beton

Korosi tulangan merupakan salah satu penyebab utama degradasi beton bertulang dan bertanggung jawab atas sebagian besar kegagalan durabilitas struktur beton. Pada kondisi normal, baja tulangan terlindungi oleh lingkungan alkalis beton. Namun, karbonasi dan penetrasi klorida dapat menurunkan alkalinitas beton dan merusak lapisan pasif baja (Zhang, P., et al., 2025; Otieno, M., et al., 2022). Korosi menghasilkan produk ekspansi yang volumenya dapat mencapai 2-6 kali volume baja awal, sehingga menimbulkan tegangan internal, retak memanjang, spalling selimut beton, dan penurunan kapasitas struktural.



Gambar 2.2. Mekanisme korosi tulangan dalam beton akibat karbonasi dan penetrasi klorida yang menyebabkan depasivasi baja, pembentukan produk korosi, serta retak dan spalling selimut beton (diadaptasi dari Angst et al. 2020, Andrade 2021, dan Bertolini et al. 2020).

Mekanisme korosi tulangan pada beton bertulang yang umumnya dipicu oleh dua proses utama, yaitu karbonasi beton dan penetrasi ion klorida. Karbonasi menurunkan pH beton akibat reaksi karbon dioksida dengan produk hidrasi semen, sehingga lapisan pasif pelindung tulangan hilang. Sementara itu, ion klorida mampu merusak lapisan pasif tulangan secara lokal meskipun pH beton masih relatif tinggi.

Setelah lapisan pasif rusak, tulangan mengalami reaksi elektrokimia yang menghasilkan produk korosi dengan volume lebih besar dibandingkan baja awal. Ekspansi produk korosi ini menimbulkan tegangan internal pada beton di sekitarnya, yang kemudian memicu retak memanjang sejajar tulangan, spalling selimut beton, dan pada tahap lanjut menyebabkan penurunan luas penampang baja serta kapasitas struktur.

Korosi tulangan merupakan mekanisme kerusakan yang sangat kritis karena berdampak langsung pada kekuatan dan keselamatan struktur beton bertulang. Oleh karena itu, identifikasi dini mekanisme korosi melalui inspeksi dan diagnosis yang tepat menjadi dasar penting dalam penentuan strategi repair beton, termasuk perbaikan lokal, perlindungan korosi, atau penerapan sistem proteksi jangka panjang.

2.3. Degradasi Kimia: Sulfat, Asam, dan Alkali-Silica Reaction (ASR)

Degradasi kimia beton terjadi akibat reaksi antara matriks semen dengan zat agresif dari lingkungan. Serangan sulfat menyebabkan pembentukan ettringite sekunder dan gypsum yang bersifat ekspansif, mengakibatkan retak dan pelunakan beton (De Belie, N., et al., 2022; Thomas, M., et al., 2020; Fournier, B., et al., 2023).

Serangan asam melarutkan kalsium hidroksida dan C-S-H, menyebabkan kehilangan massa dan kekuatan beton secara progresif. Sementara itu, ASR terjadi akibat reaksi alkali semen dengan silika reaktif pada agregat, menghasilkan gel ekspansif yang menyerap air dan menimbulkan retak peta (map cracking) (Horszczaruk, E., et al., 2021; Neville, A.M., 2020).

Tabel 2.2. Jenis degradasi kimia beton, agen agresif, dan dampaknya (diadaptasi dari Santhanam et al. 2021, Thomas 2020, dan Fournier et al. 2023).

Jenis Degradasi	Agen Agresif	Dampak Utama pada Beton & Tulangan	Tantangan Utama dalam Repair
Serangan Sulfat	Ion sulfat (SO_4^{2-})	Ekspansi pasta semen, pembentukan ettringite/ gypsum, dan retak internal	Kompatibilitas kimia material repair dan ketahanan terhadap sulfat
Serangan Asam	Lingkungan pH rendah	Pelarutan pasta semen, penurunan kekuatan, dan kehilangan massa beton	Ketahanan kimia material repair terhadap lingkungan asam
Reaksi Alkali-Silika (ASR)	Alkali semen dan silika reaktif agregat	Ekspansi gel ASR, retak peta, dan penurunan durabilitas	Pengendalian ekspansi dan mitigasi reaksi lanjutan

Tabel 2.2 menyajikan ringkasan mekanisme degradasi kimia utama pada beton, meliputi serangan sulfat, serangan asam, dan reaksi alkali-silika (ASR), beserta indikator lapangan dan dampaknya terhadap kinerja struktur. Tabel ini menegaskan bahwa degradasi kimia umumnya bersifat progresif dan internal, sehingga sering kali tidak langsung terdeteksi pada tahap awal, namun dapat menyebabkan penurunan kekuatan dan durabilitas yang signifikan dalam jangka panjang.

Serangan sulfat ditandai oleh pembentukan produk ekspansif yang menyebabkan retak dan pelunakan beton, sedangkan serangan asam mengakibatkan pelarutan pasta semen dan penipisan penampang beton secara bertahap. Reaksi alkali-silika (ASR) ditandai oleh retak berpola peta (*map cracking*) akibat ekspansi gel ASR yang menyerap air. Ketiga mekanisme ini tidak hanya

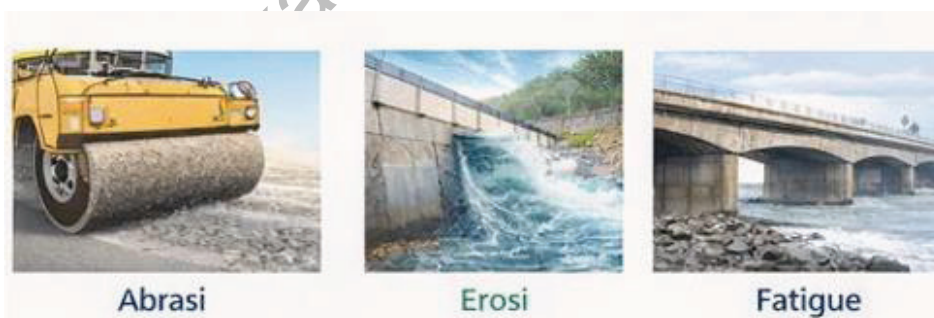
menurunkan kekuatan mekanik beton, tetapi juga mempercepat mekanisme kerusakan lain seperti penetrasi ion agresif dan korosi tulangan.

Pemahaman mekanisme degradasi kimia sangat penting dalam penentuan strategi repair beton, khususnya dalam pemilihan material repair yang kompatibel dan tahan terhadap lingkungan agresif. Dengan demikian, tabel ini berfungsi sebagai dasar konseptual untuk menghubungkan jenis lingkungan eksposur dengan respon material beton dan kebutuhan teknologi repair yang tepat

2.4. Degradasi Fisik: Abrasi, Erosi, dan Fatigue

Degradasi fisik beton disebabkan oleh aksi mekanik berulang seperti abrasi lalu lintas, erosi aliran fluida, dan beban siklik (fatigue). Abrasi umum terjadi pada lantai industri dan perkerasan, sedangkan erosi dominan pada saluran air dan struktur hidraulik (Zhu, X., et al., 2024; fib Bulletin 90, 2021).

Fatigue beton bersifat kumulatif dan sulit dideteksi pada tahap awal, namun dapat menyebabkan kegagalan mendadak jika tidak ditangani dengan tepat (De Muynck, W., et al., 2020).



Gambar 2.3. Contoh degradasi fisik beton akibat abrasi, erosi, dan beban siklik (fatigue) pada infrastruktur (disarikan dari Momber, 2021 dan Stewart, 2022).

Gambar 2.3 menggambarkan mekanisme degradasi kimia beton yang terjadi akibat interaksi beton dengan lingkungan agresif, meliputi serangan sulfat, serangan asam, dan reaksi alkali-silika (ASR). Pada serangan sulfat, ion sulfat bereaksi dengan produk hidrasi semen membentuk senyawa ekspansif seperti ettringite sekunder, yang menyebabkan ekspansi internal, retak, dan pelunakan beton. Serangan asam menyebabkan pelarutan bertahap pasta semen, khususnya kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat, sehingga menurunkan kekuatan dan integritas beton.

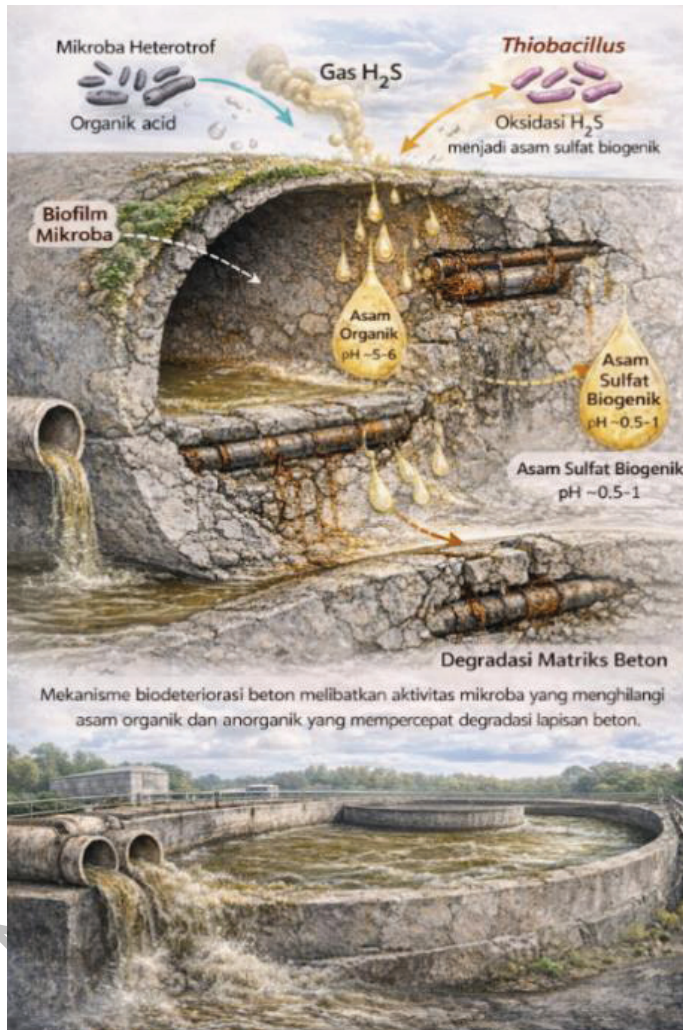
Reaksi alkali-silika (ASR) terjadi ketika alkali dalam semen bereaksi dengan silika reaktif dalam agregat, membentuk gel ekspansif yang menyerap air dan menimbulkan retak berpola peta (map cracking). Ketiga mekanisme degradasi kimia ini bersifat progresif dan dapat berlangsung secara simultan, sehingga mempercepat penurunan durabilitas dan kinerja struktur beton dalam jangka panjang.

Gambar 2.3 menegaskan bahwa degradasi kimia merupakan salah satu penyebab utama kerusakan beton pada lingkungan agresif, seperti struktur laut, industri, dan sistem sanitasi. Oleh karena itu, pemahaman mekanisme degradasi kimia sangat penting dalam pemilihan strategi repair beton, khususnya dalam penggunaan material repair yang tahan terhadap lingkungan kimia dan memiliki kompatibilitas tinggi dengan beton eksisting.

2.5. Biodeterioration dan Pengaruh Lingkungan Mikroba

Biodeterioration merupakan mekanisme degradasi beton yang disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme, terutama pada lingkungan lembap, saluran limbah, dan instalasi pengolahan air. Mikroorganisme menghasilkan asam organik dan anorganik (misalnya asam sulfat biogenik) yang mempercepat degradasi matriks beton (Alexander, M., et al., 2021; Zhu, J., et al., 2022; Jiang, G., et al., 2023).

Mekanisme ini semakin mendapat perhatian karena sering berinteraksi dengan degradasi kimia dan sulit dikendalikan hanya dengan pendekatan material konvensional (Wang, Y., et al., 2024).



Gambar 2.4. Mekanisme biodeterioration beton akibat aktivitas mikroorganisme yang menghasilkan asam dan mempercepat degradasi matriks beton (diadaptasi dari De Muyndk et al. 2020, De Belie et al. 2022, dan Alexander et al.2021).

Mekanisme degradasi fisik beton yang disebabkan oleh aksi abrasi, erosi, dan pembebanan berulang (*fatigue*). Abrasi terjadi akibat gesekan mekanis antara permukaan beton dengan partikel keras atau lalu lintas berulang, yang mengakibatkan keausan permukaan dan tereksposnya agregat. Erosi disebabkan oleh aliran fluida atau partikel tersuspensi yang secara bertahap mengikis pasta semen dan agregat halus, khususnya pada struktur hidraulik dan lingkungan berair.

Selain itu, pembebanan berulang (*fatigue*) menyebabkan akumulasi retak mikro internal yang sulit terdeteksi secara visual pada tahap awal, namun dapat berkembang menjadi retak makro dan menurunkan kapasitas struktur dalam jangka panjang. Kombinasi abrasi, erosi, dan *fatigue* sering kali mempercepat degradasi beton, terutama pada struktur yang beroperasi di lingkungan dengan beban dinamis tinggi atau aliran fluida kontinu.

Degradasi fisik tidak selalu bersifat kimiawi atau korosif, tetapi dapat terjadi murni akibat interaksi mekanis dan siklus beban. Oleh karena itu, pemahaman mekanisme degradasi fisik sangat penting dalam penentuan strategi repair beton, khususnya dalam pemilihan material repair yang memiliki ketahanan abrasi tinggi, kepadatan mikrostruktur yang baik, serta kemampuan menahan beban berulang.

2.6. Interaksi Multimekanisme Kerusakan Beton

Pada praktik lapangan, mekanisme kerusakan beton jarang terjadi secara tunggal. Retak mempercepat penetrasi klorida, korosi memperbesar retak, dan degradasi kimia memperlemah matriks beton sehingga lebih rentan terhadap abrasi dan *fatigue*. Oleh karena itu, diagnosis kerusakan beton harus dilakukan secara holistik dan berbasis mekanisme dominan.



Gambar 2.5. Interaksi multimekanisme kerusakan beton yang melibatkan retak, korosi, degradasi kimia, dan degradasi fisik (disarikan dari Angst et al. 2020, Beushausen & Alexander 2023, dan fib Model Code 2020).

Mekanisme biodeterioration beton, yaitu proses degradasi beton yang dipicu oleh aktivitas mikroorganisme pada lingkungan lembap dan agresif. Mikroba seperti bakteri pengoksidasi sulfur, bakteri penghasil asam, dan jamur berkoloni pada permukaan beton dan menghasilkan produk metabolik berupa asam anorganik maupun organik. Senyawa asam ini bereaksi dengan pasta semen, menyebabkan pelarutan kalsium hidroksida dan senyawa hidrat lainnya, sehingga struktur mikro beton menjadi rapuh dan kehilangan kekuatannya.

Proses biodeterioration umumnya diawali oleh pembentukan biofilm pada permukaan beton yang lembap. Biofilm tersebut meningkatkan retensi air dan mempercepat penetrasi zat agresif ke dalam pori-pori beton. Seiring waktu, degradasi kimia akibat

aktivitas mikroba menyebabkan retak mikro, pelunakan permukaan, dan penurunan durabilitas beton secara signifikan. Kerusakan ini sering berkembang secara progresif dan sulit terdeteksi pada tahap awal.

Biodeterioration merupakan mekanisme kerusakan yang penting, terutama pada struktur beton di lingkungan sanitasi, terowongan, sistem drainase, dan daerah tropis dengan kelembapan tinggi. Oleh karena itu, pemahaman mekanisme biodeterioration sangat diperlukan dalam perencanaan strategi repair beton, khususnya dalam pemilihan material repair yang tahan terhadap lingkungan biologis serta penerapan sistem perlindungan permukaan yang efektif.

2.7. Model Difusi Klorida dalam Beton (Fick's Second Law)

2.7.1 Dasar Teori Difusi Klorida

Penetrasi ion klorida ke dalam beton umumnya dimodelkan menggunakan hukum Fick II yang direkomendasikan oleh fib model code 2020, EN 206 dan ACI

$$C(x, t) = C_8 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl} t}} \right) \right] \quad (2-1)$$

dimana :

$C(x, t)$: Konsentrasi klorida pada kedalaman x , dan waktu t

C_8 : Konsentrasi klorida permukaan

D_{cl} : Koefisien difusi klorida (m^2 / s)

x : Tebal selimut beton (m)

t : Waktu (detik)

erf : Fungsi error

Makna teknik: beton D_{cl} kecil; Beton retak / permeable: D_{cl} besar;
Repair beton bertujuan menurunkan D_{cl} .

2.7.2 Nilai tipikal Koefisien Difusi

Material	D_{cl} (m^2/s)
Beton OPC konvensional	$1 \times 10^{-12} - 5 \times 10^{-12}$
Polymer modified repair	$5 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-12}$
ECC	$1 \times 10^{-13} - 5 \times 10^{-13}$
Geopolymer	$1 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-12}$

2.7.3 Contoh Hitungan Difusi Klorida

Data struktur:

- Selimut beton $x = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$
- $C_s = 5,0 \text{ kg/m}^3$
- Ambang korosi tulangan $C_{cr} = 0,06 \text{ kg/m}^3$
- $D_{cl} = 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Ditanya:

Berapa waktu sampai klorida mencapai tulangan?

Langkah 1 - susun persamaan

$$\frac{c_{cr}}{c_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t}}\right) \quad (2-2)$$

$$\operatorname{erf}(z) = 1 - \frac{0,6}{5} = 0,88$$

Dari tabel erf:

$$z \approx 1,10 \quad (2-3)$$

Langkah 2 – Hitung waktu

$$t = \frac{x^2}{4D_{cl}z^2} \quad (2-4)$$

$$t = \frac{0,04^2}{4 \times 2 \times 10^{-12} \times 1,10^2}$$

$$t \approx 1,65 \times 10^8 \text{ detik} \approx 5,2 \text{ tahun}$$

Interpretasi teknik

Tanpa repair, korosi mulai ± 5 tahun

■ Jika repair menurunkan $D_{cl} 10 \times \rightarrow$ umur > 50 tahun

2.8. Implikasi Mekanisme Kerusakan terhadap Strategi Repair

Setiap mekanisme kerusakan memiliki indikator, dampak struktural, dan kebutuhan repair yang berbeda. Pemilihan strategi repair yang tidak sesuai mekanisme kerusakan sering menjadi penyebab kegagalan repair dini.

Tabel 2.3. Implikasi mekanisme kerusakan beton terhadap indikator lapangan, dampak struktural, dan strategi repair yang direkomendasikan (disarikan dari ACI 562 2021, EN 1504 2020, fib Model Code 2020, serta Emmons & Vaysburd 2020).

Mekanisme Kerusakan	Indikator Utama	Dampak terhadap Struktur	Strategi Repair yang Direkomendasikan
Retak (Cracking)	Pola retak dan lebar retak	Penurunan kekedapan, percepatan masuknya air dan zat agresif	Injeksi resin, sealing permukaan
Korosi Tulangan	Spalling, noda karat, delaminasi	Penurunan luas efektif tulangan dan kapasitas struktural	Patch repair + proteksi tulangan (coating / inhibitor)
Degradasi Kimia	Retak ekspansif, pelunakan permukaan	Penurunan kekuatan dan durabilitas beton	Material repair tahan kimia
Degradasi Fisik	Aus, abrasi, erosi	Penipisan elemen dan kehilangan penampang	Overlay berkinerja tinggi / lapisan protektif

Tabel 2.3 merangkum hubungan antara mekanisme kerusakan beton, indikator lapangan, dampak terhadap kinerja struktur, dan strategi repair yang direkomendasikan. Tabel ini menegaskan bahwa pemilihan metode perbaikan beton tidak dapat dilakukan secara generik, melainkan harus berbasis pada mekanisme kerusakan dominan yang teridentifikasi melalui inspeksi dan diagnosis.

Setiap mekanisme kerusakan memiliki karakteristik yang berbeda. Retak akibat susut atau temperatur umumnya berdampak pada penurunan durabilitas dan dapat ditangani dengan metode sealing atau coating. Sebaliknya, retak struktural dan korosi tulangan berimplikasi langsung pada kapasitas struktur, sehingga memerlukan kombinasi repair dan strengthening. Degradasi kimia

seperti serangan sulfat, asam, dan reaksi alkali-silika menuntut penggunaan material repair yang kompatibel dan tahan terhadap lingkungan agresif.

Strategi repair harus mempertimbangkan tingkat keparahan kerusakan dan kondisi lingkungan, karena faktor tersebut sangat mempengaruhi efektivitas dan umur layanan hasil perbaikan. Dengan demikian, Tabel 2.3 berfungsi sebagai alat bantu keputusan (*decision support tool*) yang menghubungkan hasil evaluasi mekanisme kerusakan dengan solusi teknis repair yang efektif, berkelanjutan, dan ekonomis.

2.8.1 Model Empiris Kedalaman Karbonasi

Karbonasi beton umumnya dimodelkan dengan:

$$x_c = k_c \sqrt{t} \quad (2-5)$$

dimana:

- x_c = kedalaman karbonasi (mm)
- k_c = koefisien karbonasi (mm / $\sqrt{th}$)
- t = waktu (tahun)

2.8.2 Nilai Koefisien Karbonasi Tipikal

Kondisi Beton	k_c (mm / $\sqrt{th}$)
Beton padat, curing baik	2-4
Beton mutu sedang	5-8
Beton retak / porous	8-12
Repair mortar densified	1-3

2.8.3 Contoh Hitungan Karbonasi

Data struktur:

- Selimut beton = 30 mm
- $k_c = 6 \text{ mm}/\sqrt{th}$

Ditanya:

Kapan karbonasi mencapai tulangan?

$$30 - 6\sqrt{t}$$

$$\sqrt{t} = 5 \Rightarrow t = 25 \text{ tahun}$$

Interpretasi teknik

- Tanpa repair $\rightarrow$ korosi karbonasi mulai 25 tahun
- Dengan overlay densified ($k_c = 2$) $\rightarrow$ maka waktu korosi menjadi lebih lama.

2.9. Model Gabungan: Klorida + Karbonasi

fib Model Code 2020 menegaskan bahwa **mekanisme dominan adalah yang tercepat**:

$$t_{mit} = \min(t_{chloride}, t_{carbonation}) \quad (2-6)$$

Contoh:

- $t_{chloride} = 5 \text{ th}$
- $t_{carbonation} = 25 \text{ th}$

klorida dominan $\rightarrow$ repair difokuskan pada **pengendalian permeabilitas**.

2.10. Implikasi Langsung terhadap Strategi Repair

Hasil pemodelan durabilitas beton memberikan informasi penting mengenai mekanisme degradasi dominan yang terjadi pada suatu struktur. Parameter seperti laju difusi klorida, kedalaman karbonasi, dan ketebalan selimut beton dapat digunakan untuk menentukan jenis intervensi repair yang paling efektif. Dengan kata lain, hasil model tidak hanya berfungsi sebagai alat prediksi umur layanan, tetapi juga sebagai dasar dalam menentukan strategi repair yang tepat secara teknis dan ekonomis.

Apabila hasil model menunjukkan bahwa difusi klorida terjadi dengan cepat, maka risiko korosi tulangan meningkat secara signifikan karena ion klorida dapat menembus beton hingga mencapai permukaan baja. Dalam kondisi ini, strategi repair yang direkomendasikan adalah penggunaan overlay beton berkinerja tinggi atau material dengan mikrostruktur yang sangat rapat, seperti *densified overlay* atau *Engineered Cementitious Composite (ECC)*. Material tersebut memiliki porositas yang sangat rendah serta kemampuan menahan penetrasi klorida sehingga dapat memperlambat proses difusi dan memperpanjang umur layanan struktur.

Dalam beberapa kondisi, model dapat menunjukkan bahwa baik difusi klorida maupun karbonasi terjadi secara simultan dan pada tingkat yang tinggi. Situasi ini menunjukkan tingkat risiko korosi tulangan yang sangat tinggi dan membutuhkan strategi repair yang lebih komprehensif. Pendekatan yang sering digunakan adalah kombinasi patch repair pada area yang telah mengalami kerusakan dengan metode perlindungan katodik (*cathodic protection*) atau penggunaan inhibitor korosi. Kombinasi ini bertujuan tidak hanya memperbaiki beton yang telah rusak, tetapi juga mengendalikan proses korosi yang masih berlangsung pada tulangan.

Selain faktor mekanisme degradasi kimia, ketebalan selimut beton (cover thickness) juga memiliki implikasi langsung terhadap strategi repair. Apabila model menunjukkan bahwa selimut beton terlalu tipis sehingga tidak mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap tulangan, maka solusi yang lebih tepat adalah recasting atau penambahan overlay beton untuk meningkatkan ketebalan selimut. Dengan meningkatkan jarak antara tulangan dan permukaan beton, waktu yang dibutuhkan bagi agen agresif untuk mencapai tulangan dapat diperpanjang secara signifikan.

2.11. Implikasi Strategi Repair

Implikasi dari strategi repair yang dipilih tidak hanya berkaitan dengan perbaikan kerusakan yang telah terjadi, tetapi juga mempengaruhi kinerja jangka panjang struktur beton serta biaya pemeliharaan selama masa layanan. Oleh karena itu, strategi repair harus dirancang berdasarkan pemahaman yang baik terhadap mekanisme transportasi zat agresif dalam beton, kondisi lingkungan, serta karakteristik material yang digunakan.

Pada kondisi di mana difusi klorida menjadi mekanisme degradasi utama, penggunaan overlay beton densifikasi tinggi atau material komposit seperti ECC dapat secara signifikan menurunkan koefisien difusi klorida. Hal ini terjadi karena mikrostruktur material yang lebih rapat mengurangi konektivitas pori sehingga jalur transportasi ion klorida menjadi lebih terbatas. demikian, waktu yang dibutuhkan klorida untuk mencapai tulangan akan meningkat dan risiko korosi dapat dikendalikan. Apabila karbonasi menjadi mekanisme degradasi dominan, maka strategi repair harus berfokus pada pengendalian penetrasi karbon dioksida serta pemulihan kondisi kimia beton. Coating anti-karbonasi berfungsi sebagai penghalang difusi CO_2 , metode restorasi alkalinitas dapat mengembalikan kondisi pH tinggi untuk mempertahankan lapisan pasif pada tulangan baja.

BAB 3

INSPEKSI DAN DIAGNOSIS KERUSAKAN BETON

Bab ini membahas metode inspeksi dan diagnosis kerusakan beton sebagai tahapan paling krusial sebelum penentuan strategi repair. Berbagai studi internasional menunjukkan bahwa kegagalan repair beton lebih sering disebabkan oleh diagnosis yang tidak tepat dibandingkan oleh kegagalan material atau kesalahan metode pelaksanaan. Repair yang dilakukan tanpa pemahaman menyeluruh terhadap mekanisme kerusakan sering kali hanya bersifat kosmetik dan berujung pada kerusakan ulang dalam waktu singkat (ACI Committee 562, 2021; EN 1504, 2020; fib Bulletin, 2020).

Dalam teknologi repair beton modern, inspeksi dan diagnosis tidak lagi dipandang sebagai tahapan administratif, melainkan sebagai proses rekayasa berbasis data yang menentukan keberhasilan teknis, efisiensi biaya, serta keberlanjutan jangka panjang. Oleh karena itu, pendekatan diagnosis saat ini bersifat terintegrasi, mengombinasikan inspeksi visual, pengujian non-destruktif (NDT), pengujian semi-destruktif (SDT), serta analisis kinerja dan umur layanan struktur.

3.1 Tujuan dan Prinsip Inspeksi Struktur Beton

Inspeksi struktur beton bertujuan untuk mengidentifikasi jenis kerusakan, tingkat keparahan, penyebab dominan, serta implikasinya terhadap kinerja dan keselamatan struktur. Secara konseptual, inspeksi yang efektif harus mampu menjawab tiga pertanyaan mendasar:

1. Apa yang rusak? (manifestasi dan distribusi kerusakan)
2. Mengapa kerusakan terjadi? (mekanisme dominan)
3. Apa dampaknya?

Standar internasional seperti ACI 562 dan EN 1504 menegaskan bahwa inspeksi bukan sekadar dokumentasi visual, melainkan proses teknis yang menjadi dasar perancangan repair dan rehabilitasi struktur. Prinsip utama inspeksi meliputi:

- Keandalan data (akurasi dan repeatability),
- Keterwakilan lokasi uji,
- Keterlacakan hasil inspeksi terhadap mekanisme kerusakan,
- Kesesuaian metode inspeksi dengan tujuan diagnosis.

Tabel 3.1. Tujuan inspeksi dan output diagnosis struktur beton (ACI 562, 2021; fib MC 2020).

Tahap Inspeksi	Tujuan Utama	Output Teknis
Inspeksi awal	Identifikasi kerusakan	Daftar kerusakan & lokasi
Inspeksi lanjutan	Penentuan mekanisme	Mekanisme dominan
Evaluasi kinerja	Dampak struktural	Kapasitas sisa
Prediksi umur	Perencanaan jangka panjang	Remaining service life

Tabel 3.1 menjelaskan hubungan sistematis antara tahapan inspeksi struktur beton dan output teknis yang dihasilkan. Inspeksi awal berfokus pada identifikasi kerusakan visual, sementara inspeksi lanjutan bertujuan menentukan mekanisme dominan sebagaimana dibahas pada Bab 2. Evaluasi kinerja dan prediksi umur layanan sisa menjadi dasar kuantitatif dalam perencanaan strategi repair dan rehabilitasi. Tabel ini menegaskan bahwa inspeksi merupakan proses bertahap dan berorientasi pada pengambilan keputusan teknis.

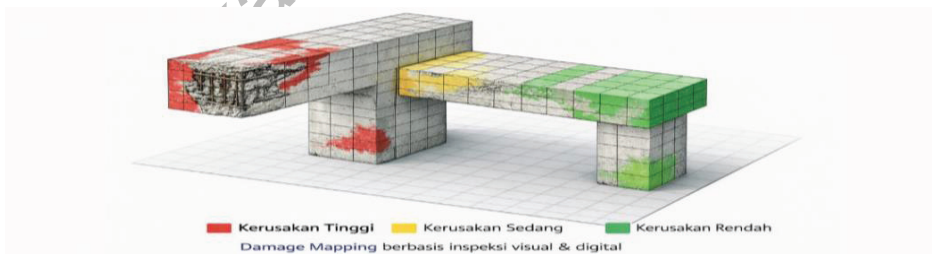
3.2 Inspeksi Visual dan Damage Mapping

Inspeksi visual merupakan tahap awal dan paling fundamental dalam diagnosis kerusakan beton. Aktivitas ini mencakup identifikasi retak, spalling, delaminasi, perubahan warna permukaan, efflorescence, kebocoran, serta ekspos tulangan. Hasil inspeksi visual kemudian disusun dalam bentuk damage map, yaitu peta distribusi dan intensitas kerusakan pada elemen struktur (Ye, X.W., et al., 2021; Dorafshan, S., et al., 2020).

Meskipun bersifat kualitatif, inspeksi visual yang sistematis memiliki nilai diagnostik tinggi, khususnya untuk:

- Menentukan area kritis,
- Mengelompokkan jenis kerusakan,
- Menentukan prioritas pengujian lanjutan.

Perkembangan teknologi digital seperti drone, fotogrametri, laser scanning, dan image processing berbasis kecerdasan buatan telah meningkatkan akurasi dan konsistensi inspeksi visual. Teknologi ini sangat efektif untuk struktur berskala besar seperti jembatan, pelabuhan, dan bangunan tinggi (Cha, Y.J., et al., 2021 ; Zhang, P., et al., 2025).



Gambar 3.1. *Damage mapping struktur beton yang menunjukkan distribusi dan tingkat keparahan kerusakan (tinggi, sedang, dan rendah) berdasarkan hasil inspeksi visual dan inspeksi digital, sebagai dasar penentuan area kritis untuk pengujian lanjutan dan perencanaan strategi repair (diadaptasi dari ACI 562 2021, EN 2020),—dan Morgenthal et al., 2019).*

Gambar 3.1 menggambarkan konsep damage mapping sebagai keluaran utama dari tahap inspeksi visual pada struktur beton. Area struktur diklasifikasikan ke dalam beberapa tingkat keparahan kerusakan, yaitu kerusakan tinggi, sedang, dan rendah, berdasarkan indikator visual seperti lebar dan pola retak, tingkat spalling, serta ekspos tulangan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi zona kritis yang memerlukan perhatian khusus dan pengujian lanjutan menggunakan metode non-destruktif maupun semi-destruktif.

Damage mapping berfungsi sebagai jembatan antara inspeksi kualitatif dan diagnosis kuantitatif. Dengan memetakan kerusakan secara sistematis, engineer dapat menentukan lokasi pengambilan sampel core, titik pengujian NDT/SDT, serta prioritas perbaikan secara rasional. Integrasi teknologi inspeksi digital, seperti drone dan pemrosesan citra berbasis kecerdasan buatan, semakin meningkatkan konsistensi dan akurasi damage mapping, khususnya pada struktur berskala besar dan sulit dijangkau.

Pendekatan damage mapping yang terdokumentasi dengan baik juga memudahkan komunikasi teknis antara perencana, pemilik aset, dan kontraktor, serta menjadi dasar dalam penyusunan *decision matrix* untuk pemilihan strategi repair beton yang efektif dan berkelanjutan.

3.3 Pengujian Non-Destructive Testing (NDT)

Pengujian non-destruktif (NDT) memungkinkan evaluasi kondisi beton tanpa merusak struktur, sehingga sangat sesuai untuk inspeksi awal dan monitoring berkala. Metode NDT yang umum digunakan meliputi:

- Rebound hammer – estimasi kekerasan permukaan,
- Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) – homogenitas dan kualitas beton,

- Ground Penetrating Radar (GPR) – posisi tulangan dan delaminasi,
- Infrared Thermography – deteksi debonding dan

Setiap metode NDT memiliki keterbatasan, sehingga literatur mutakhir merekomendasikan penggunaan multi-NDT secara terpadu untuk meningkatkan reliabilitas diagnosis dan mengurangi ketidakpastian interpretasi data (Washer, G.A., et al., 2021; Gucunski, N., et al., 2025).

Tabel 3.2. Metode non-destructive testing (NDT) untuk diagnosis beton (ASTM C805, 2018; C597, 2016).

Metode NDT	Parameter Utama	Kelebihan	Keterbatasan
Rebound hammer	Kekerasan permukaan	Cepat & murah	Tidak representatif volume
UPV	Homogenitas beton	Deteksi retak internal	Sensitif kondisi kelembapan
GPR	Posisi tulangan	Non-invasif	Interpretasi kompleks
Rebound hammer	Kekerasan permukaan	Cepat & murah	Tidak representatif volume

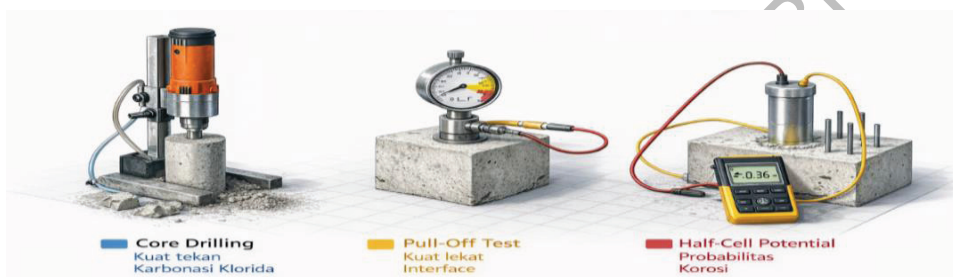
Tabel 3.2 merangkum metode NDT yang umum digunakan dalam diagnosis kondisi beton, termasuk parameter yang diukur, kelebihan, dan keterbatasannya. Tabel ini menegaskan bahwa tidak ada satu metode NDT yang bersifat universal, sehingga penggunaan multi-NDT secara terpadu sangat dianjurkan untuk meningkatkan reliabilitas diagnosis dan meminimalkan ketidakpastian interpretasi data.

3.4 Pengujian Semi-Destructive Testing (SDT)

Pengujian semi-destruktif (SDT) memberikan data kuantitatif yang lebih akurat dibandingkan NDT dengan tingkat kerusakan lokal

yang masih dapat diterima. Metode SDT meliputi core drilling, pull-off test, dan half-cell potential measurement (ASTM C42, 2021; ASTM C1583, 2020).

Core drilling memungkinkan pengujian kuat tekan aktual, kedalaman karbonasi, penetrasi klorida, serta analisis mikrostruktur. Pull-off test merupakan metode utama untuk mengevaluasi kuat lekat antara beton eksisting dan material repair. Pengukuran half-cell potential (ASTM C876) digunakan untuk menilai probabilitas korosi tulangan (ASTM C876, 2022).



Gambar 3.2. Metode semi-destructive testing (SDT) yang umum digunakan dalam diagnosis kerusakan beton, meliputi core drilling untuk evaluasi kuat tekan dan durabilitas beton, pull-off test untuk menilai kuat lekat antara beton eksisting dan material repair, serta half-cell potential measurement untuk menentukan probabilitas terjadinya korosi tulangan (disarikan dari ACI 562, 2021; ASTM C42, 2021; C1583, 2020 dan C876, 2022).

Gambar 3.2 mengilustrasikan tiga metode utama semi-destructive testing (SDT) yang digunakan untuk memperoleh data kuantitatif dalam diagnosis kondisi struktur beton. Metode SDT memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan pengujian non-destruktif, dengan kerusakan lokal yang masih dapat diterima dan umumnya dapat diperbaiki kembali setelah pengujian.

Core drilling digunakan untuk mendapatkan sampel beton utuh dari struktur eksisting. Pengujian ini memungkinkan evaluasi kuat tekan aktual, kedalaman karbonasi, penetrasi klorida, serta analisis

mikrostruktur dan komposisi material beton. Data hasil core drilling sering dijadikan dasar kalibrasi hasil pengujian non-destruktif.

Pull-off test merupakan metode utama untuk mengevaluasi kuat lekat (bond strength) antara beton eksisting dan material repair. Parameter ini sangat kritis karena kegagalan repair beton sering kali terjadi pada zona interface. Nilai kuat lekat minimum yang dipersyaratkan biasanya ditetapkan dalam standar dan spesifikasi repair.

Half-cell potential measurement digunakan untuk menilai probabilitas terjadinya korosi tulangan berdasarkan perbedaan potensial listrik pada permukaan beton. Metode ini sangat efektif untuk mengidentifikasi area dengan aktivitas korosi tinggi dan membantu menentukan apakah strategi repair harus mencakup perlindungan korosi tambahan.

Secara keseluruhan, kombinasi metode SDT sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2 memungkinkan diagnosis kondisi beton yang lebih andal dan menjadi dasar penting dalam penentuan strategi repair beton yang tepat dan berkelanjutan.

3.5 Evaluasi Tingkat Kerusakan dan Kinerja Struktur

Hasil inspeksi visual, NDT, dan SDT harus dianalisis secara **terpadu** untuk menentukan tingkat kerusakan dan dampaknya terhadap kinerja struktur. Evaluasi ini mencakup: Kapasitas sisa (residual capacity), Tingkat keamanan struktur, Potensi kegagalan progresif. Pendekatan **performance-based assessment** semakin luas diterapkan, khususnya untuk struktur eksisting yang tidak memenuhi persyaratan desain terkini atau mengalami perubahan fungsi. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan repair yang lebih rasional dan berbasis risiko (Fardis, M.N., 2021).

3.6 Prediksi Umur Layanan Sisa (*Remaining Service Life*)

Prediksi umur layanan sisa merupakan elemen kunci dalam perencanaan repair beton jangka panjang. Model berbasis difusi klorida, laju karbonasi, dan kinetika korosi digunakan untuk memperkirakan waktu hingga terjadinya kerusakan kritis (Pinho, R., et al., 2022; Tuutti, K., 2020; Tang, L., Nilsson, L.O., 2021).

Pendekatan probabilistik dan berbasis keandalan direkomendasikan untuk mengakomodasi variasi material, lingkungan, dan beban. Metode ini memberikan dasar kuantitatif untuk menentukan apakah repair bersifat sementara, rehabilitasi menyeluruh, atau penguatan struktur diperlukan (Papadakis, V.G., 2020).



Gambar 3.3. Konsep *remaining service life* struktur beton yang menggambarkan penurunan kinerja struktur akibat mekanisme degradasi, serta perpanjangan umur layanan yang dicapai melalui intervensi repair pada waktu yang tepat (disarikan dari Andrade & Alonso, 2021; Stewart, 2022; dan fib Model Code 2020).

Gambar 3.3 menunjukkan konsep *remaining service life* (RSL) sebagai dasar dalam pengambilan keputusan repair beton jangka panjang. Kurva degradasi menggambarkan penurunan kinerja struktur beton seiring waktu akibat mekanisme kerusakan seperti karbonasi, penetrasi klorida, korosi tulangan, dan degradasi fisik. Apabila tidak dilakukan intervensi, kinerja struktur akan terus menurun hingga melewati batas kinerja minimum yang dapat

diterima, sehingga meningkatkan risiko kegagalan dan biaya perbaikan yang lebih besar.

Intervensi repair yang dilakukan pada waktu yang tepat mampu mengubah lintasan degradasi, meningkatkan kinerja struktur, dan memperpanjang umur layanan efektif. Besarnya perpanjangan umur layanan sangat dipengaruhi oleh ketepatan diagnosis, jenis strategi repair yang diterapkan, serta kondisi lingkungan dan beban struktur.

Konsep remaining service life juga menjadi dasar penerapan pendekatan probabilistik dan berbasis keandalan, di mana ketidakpastian material, lingkungan, dan beban diperhitungkan dalam estimasi umur layanan sisa. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan repair yang lebih rasional, termasuk penentuan apakah repair bersifat sementara, rehabilitasi menyeluruh, atau penguatan struktur diperlukan.

Dengan demikian, Gambar 3.3 menegaskan bahwa inspeksi dan diagnosis bukan hanya bertujuan mengidentifikasi kondisi saat ini, tetapi juga memproyeksikan kinerja struktur di masa depan, sehingga repair beton dapat dirancang secara efektif, ekonomis, dan berkelanjutan.

3.7 Decision Matrix untuk Strategi Repair

Decision matrix digunakan untuk menghubungkan hasil diagnosis dengan strategi repair yang paling sesuai. Parameter yang umum digunakan meliputi: Jenis dan mekanisme, kerusakan, Tingkat keparahan, Lingkungan eksposur, Umur layanan target, dan Kendala ekonomi.

Pendekatan ini memastikan bahwa strategi repair yang dipilih tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga optimal dari sisi biaya siklus hidup dan keberlanjutan.

Tabel 3.3. Decision matrix diagnosis dan strategi repair beton (ACI 562, 2021; EN 1504, 2020).

Mekanisme Kerusakan	Tingkat Kerusakan	Strategi Repair
Retak non-struktural	Rendah	Sealing / coating
Retak struktural	Tinggi	Injection + strengthening
Korosi aktif	Sedang-tinggi	Patch repair + proteksi
Degradasi kimia	Tinggi	Material tahan kimia

Tabel 3.3 menunjukkan decision matrix yang menghubungkan mekanisme kerusakan, tingkat keparahan, dan kondisi lingkungan dengan strategi repair yang direkomendasikan. Pendekatan ini memastikan bahwa strategi repair tidak dipilih secara generik, melainkan berbasis diagnosis teknis dan target kinerja struktur. Decision matrix juga berfungsi sebagai alat komunikasi yang efektif antara perencana, pemilik aset, dan pelaksana.

3.8 Konsep Remaining Service life (RSL)

Remainig Service Life (RSL) adalah **sisu umur layanan struktur** sejak waktu evaluasi hingga kondisi batas (limit state) tercapai. Dalam konteks repair beton, RSL digunakan untuk menjawab:

- *Apakah repair diperlukan sekarang?*
- *Jenis repair apa yang optimal?*
- *Berapa umur layanan pasca-repair yang realistis?*

Secara umum:

$$RSL = t_{failure} - t_{current} \quad (3-1)$$

Dimana $t_{failure}$ ditentukan oleh **model degradasi** (Bab 2) dan kriteria kinerja (durabilitas/struktur).

3.9 Dua Fase Umur Layanan Beton Bertulang

Sesuai **fib Model Code 2020** dan **Tuutti Model**, umur layanan dibagi menjadi:

$$t_{service} = t_i + t_p \quad (3-2)$$

- t_i = **waktu inisiasi** (hingga korosi mulai)
- t_p = **waktu propagasi** (hingga kerusakan tak dapat diterima)

Makna Teknik

- Repair preventif → memperpanjang t_i
- Repair kuratif → mengendalikan t_p

3.10 Model Kuantitatif Remaining Service Life

3.10.1 RSL berbasis Difusi Klorida

Jika hasil Bab 2 memberikan:

$$t_i = 5,2 \text{ tahun}$$

dan inspeksi menunjukkan:

$$t_{current} = 3 \text{ tahun}$$

maka

$$RSL_{inisiasi} = 5,2 - 3 = 2,2 \text{ tahun}$$

Repair harus dilakukan ≤ 2 tahun ke depan.

3.10.2 RSL berbasis Karbonasi

Dengan:

$$x_c = k_c \sqrt{t} \quad (3-3)$$

Jika selimur = 30 mm dan:

- $k_c = 6 \text{ mm} / \sqrt{th}$
- Usia strktur = 20 th

$$x_c = 6 \sqrt{20} \approx 26,8 \text{ mm}$$



RSL karbonasi $\approx$ 3-4 tahun

3.10.3 Konsep Reliability Index (β)

Reliability Index (β) mengukur **tingkat keamanan probabilistik** struktur terhadap kegagalan:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3-4)$$

di mana:

- R = resistansi (kapasitas)
- S = beban / aksi degradasi
- μ, σ = mean & standar deviasi

Semakin besar $\beta \rightarrow$ semakin aman.

3.10.4 Contoh Hitungan Reliability Index (β)

Data stuktur:

- Kapasitas lentur mean $\mu_R = 450$ kNm
- Beban lentur mean $\mu_S = 360$ kNm
- $\sigma_R = 45$ KnM
- $\sigma_S = 36$ KnM

Hitung β

$$\beta = \frac{450 - 360}{\sqrt{45^2 + 36^2}}$$

$$\beta = \frac{90}{\sqrt{2025 + 1296}} = \frac{90}{57,6}$$

$$\beta \approx 1,56$$

Interpretasi

- $\beta = 1,56 < 3,0 \rightarrow$ stuktur tidak andal
- Repair struktural **wajib**

3.11 Pengaruh Degradasi terhadap β

Korosi tulangan $\rightarrow$ penurunan luas baja:

$$A_s(t) = A_{s0} - \pi d \cdot v_{corr} \cdot t \quad (3-5)$$

Jika:

- Laju korosi $v_{corr} = 0,05$ m/th
- Waktu = 10 th

Penurunan kapasitas $\rightarrow \beta$ turun drastic

3.12 Efek Repair terhadap Reliability Index

Strategi Repair	Dampak β
Patch repair saja	$\uparrow$ kecil
Patch + inhibitor	$\uparrow$ sedang
CP / ECC overlay	$\uparrow$ besar
Strengthening	$\uparrow\uparrow$

Contoh:

- β awal = 1,6
- setelah CP + overlay $\rightarrow \beta = 3,8$

aman ≥ 30 tahun

3.13 Decision Rule Berbasis RSL & β

Kondisi	Keputusan
RSL > 20 th & $\beta \geq$ target	Monitoring
RSL < 10 th & $\beta \geq$ target	Preventive repair
RSL < 5 th & $\beta <$ target	Major repair
B < 2,0	Strengthening / replacement

BAB 4

PRINSIP DESAIN REPAIR BETON

Prinsip-prinsip fundamental dalam **desain repair beton** yang menentukan keberhasilan perbaikan baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Berbeda dengan desain beton baru, desain repair beton harus berangkat dari kondisi aktual struktur eksisting yang telah mengalami degradasi, sehingga pendekatannya bersifat kondisional, adaptif, dan berbasis kinerja.

Berbagai studi menunjukkan bahwa kegagalan repair beton jarang disebabkan oleh rendahnya mutu material repair, tetapi lebih sering akibat desain yang tidak kompatibel dengan beton eksisting, baik dari sisi mekanik, termal, kimia, maupun durabilitas jangka panjang (Emmons, P.H., Vaysburd, A.M., 2020; Gálvez, J.C., et al., 2021; Pacheco-Torgal, F., et al., 2022). Oleh karena itu, desain repair beton modern menekankan integrasi antara hasil inspeksi dan diagnosis dengan tujuan kinerja pasca-repair.

Pendekatan desain repair terkini mengadopsi konsep *compatibility-based design*, *durability-oriented design*, dan *service life-based design*, yang seluruhnya bertujuan memastikan bahwa sistem repair bekerja sebagai bagian dari struktur eksisting, bukan sebagai elemen asing yang justru memicu kerusakan ulang.

4.1 Tujuan Desain Repair Beton

Tujuan utama desain repair beton adalah memulihkan dan mempertahankan kinerja struktur sesuai dengan kebutuhan fungsional dan keselamatan yang ditetapkan. Secara lebih luas, tujuan desain repair meliputi:

1. Pemulihan integritas struktural dan non-struktural.
2. Pengendalian mekanisme kerusakan dominan (korosi, degradasi kimia, fisik).
3. Peningkatan durabilitas terhadap lingkungan eksposur.
4. Perpanjangan umur layanan struktur secara terukur.
5. Optimalisasi biaya siklus hidup dan dampak lingkungan.

Standar ACI 562 dan EN 1504 menegaskan bahwa desain repair harus berbasis performance objectives, bukan sekadar menutup gejala kerusakan yang tampak di permukaan (Morgan, D.R., 2020; Courard, L., et al., 2021). Dengan demikian, desain repair beton merupakan proses rekayasa yang bersifat tujuan-berbasis (*goal-oriented*).

Tabel 4.1. Tujuan Desain Repair Beton dan Parameter Kinerja

Tujuan Desain	Parameter Kinerja	Indikator Evaluasi
Pemulihan fungsi	Kekuatan & kekakuan	Kapasitas sisa
Peningkatan durabilitas	Permeabilitas, resistansi kimia	Laju degradasi
Kontrol korosi	Potensial korosi, laju korosi	Umur layanan
Efisiensi ekonomi	Biaya siklus hidup	LCC analysis

Tabel ini menunjukkan bahwa desain repair beton harus diturunkan ke dalam parameter kinerja yang dapat dievaluasi secara teknis dan kuantitatif, bukan sekadar pertimbangan visual atau empiris.

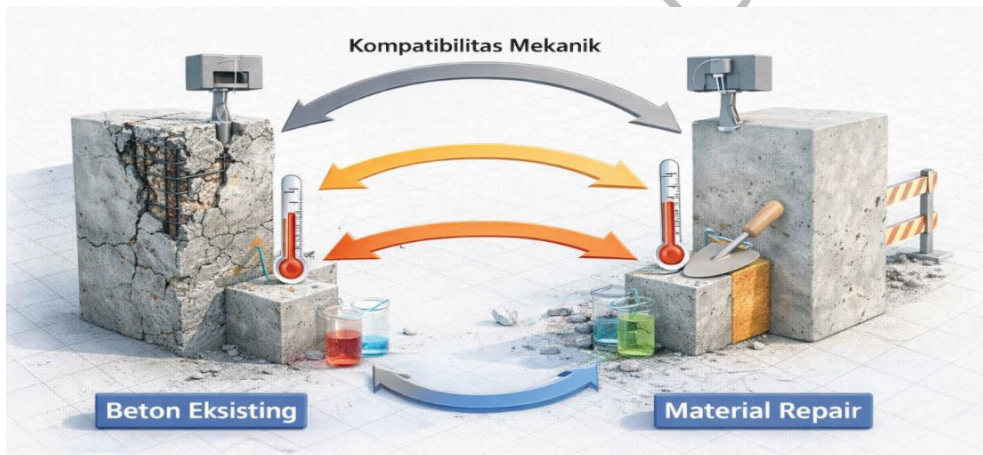
4.2 Konsep *Compatibility* dalam Repair Beton

Konsep *compatibility* merupakan prinsip paling mendasar dalam desain repair beton. Material repair harus kompatibel dengan beton eksisting agar sistem repair mampu bekerja secara monolitik tanpa menimbulkan konsentrasi tegangan atau kegagalan antarmuka.

Kompatibilitas mencakup tiga aspek utama:

- Kompatibilitas mekanik (modulus elastisitas, kuat tekan, kuat tarik),
- Kompatibilitas termal (koefisien muai),
- Kompatibilitas kimia (reaktivitas dan stabilitas).

Material repair dengan modulus elastisitas jauh lebih tinggi dari beton eksisting cenderung menarik tegangan dan memicu retak di zona transisi. Sebaliknya, material yang terlalu lunak tidak mampu mentransfer beban secara efektif (Zanotti, C., et al., 2022; Beushausen, H., Alexander, M., 2023; Bentz, D.P., et al., 2020).



Gambar 4.1. Konsep kompatibilitas (*compatibility-based design*) dalam repair beton yang mencakup kompatibilitas mekanik, termal, dan kimia antara beton eksisting dan material repair (diadaptasi dari EN 1504, 2020; ACI 562, 2021; Neville, 2011; dan fib Model Code 2020).

Prinsip kompatibilitas sebagai fondasi utama desain repair beton, yang menekankan bahwa material repair harus bekerja selaras dengan beton eksisting sebagai satu sistem terpadu. Kompatibilitas dalam repair beton tidak hanya mencakup kesesuaian kuat tekan, tetapi juga melibatkan kompatibilitas mekanik, termal, dan kimia.

Kompatibilitas mekanik mencakup kesesuaian modulus elastisitas, kuat tarik, dan kapasitas deformasi antara material repair dan beton lama. Perbedaan yang signifikan dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada antarmuka, memicu retak ulang atau debonding. Kompatibilitas termal berkaitan dengan kesesuaian koefisien muai termal dan respons terhadap fluktuasi temperatur, yang sangat penting pada struktur yang terekspos lingkungan luar. Kompatibilitas kimia memastikan bahwa tidak terjadi reaksi merugikan antara material repair dan beton eksisting, termasuk terkait alkalinitas, ion agresif, dan stabilitas jangka panjang.

Gambar ini menegaskan bahwa kegagalan repair beton sering kali bukan disebabkan oleh mutu material repair yang rendah, melainkan oleh ketidakcocokan sifat material terhadap beton eksisting dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, desain repair beton modern harus mengutamakan pemilihan material dan sistem repair yang kompatibel secara menyeluruh, bukan sekadar memiliki kuat tekan tinggi.

Secara konseptual, Gambar 4.1 berfungsi sebagai kerangka dasar desain repair beton **berbasis** kompatibilitas, yang menjadi prasyarat utama untuk mencapai durabilitas jangka panjang dan keberhasilan repair yang berkelanjutan.

4.3 Kompatibilitas Termal dan Shrinkage

Perbedaan koefisien muai termal antara material repair dan beton eksisting dapat menimbulkan tegangan berulang akibat fluktuasi suhu harian maupun musiman. Selain itu, shrinkage material repair, khususnya pada umur dini, merupakan penyebab utama retak awal dan debonding (Schindler, A.K., et al., 2021; Hooton, R.D., et al., 2022).

Desain repair harus mempertimbangkan:

- Penggunaan mortar shrinkage-compensated,
- Kontrol rasio air-binder,
- Sistem curing yang memadai.

Literatur mutakhir menekankan bahwa early-age behavior material repair berkinerja tinggi harus menjadi bagian eksplisit dari desain, bukan hanya pertimbangan pelaksanaan (Cusson, D., et al., 2023).

4.4 Durability-Based Repair Design

Pendekatan durability-based design menempatkan ketahanan jangka panjang sebagai fokus utama desain repair beton. Repair tidak hanya memulihkan kerusakan saat ini, tetapi juga harus menghambat mekanisme degradasi yang masih aktif (Andrade, C., 2020; Angst, U., et al., 2021).

Faktor lingkungan yang harus dipertimbangkan meliputi: Paparan klorida dan karbonasi, Lingkungan sulfat dan asam, dan Lingkungan biologis (biodeterioration).

Material repair harus memiliki permeabilitas rendah, ketahanan kimia tinggi, serta kemampuan melindungi tulangan dari korosi lanjutan (Zhang, P., et al., 2025).

Tabel 4.2. Lingkungan Eksposur dan Implikasi Desain Repair

Lingkungan	Mekanisme Dominan	Strategi Desain
Laut	Klorida & korosi	Material densitas tinggi
Industri	Asam & sulfat	Repair tahan kimia
Tropis lembap	Biodeterioration	Coating protektif

Tabel ini menghubungkan kondisi lingkungan dengan fokus utama desain repair, sehingga mencegah pendekatan generik yang tidak efektif

4.5 Desain Repair Berbasis Umur Layanan (*Service Life Design*)

Pendekatan *service life design* bertujuan memastikan bahwa sistem repair mampu mencapai umur layanan target yang ditetapkan. Pendekatan ini menggunakan model kuantitatif seperti:

- Difusi klorida,
- Laju karbonasi,
- Kinetika korosi tulangan

Pendekatan probabilistik semakin banyak diterapkan untuk mengakomodasi variasi material, lingkungan, dan kualitas pelaksanaan, sehingga memungkinkan evaluasi risiko dan perbandingan berbagai opsi repair (Papadakis, V.G., 2020).



Gambar 4.2. Konsep desain repair beton berbasis umur layanan (*service life-based repair design*) yang menghubungkan diagnosis kerusakan, pemilihan sistem repair, dan target umur layanan struktur (diadaptasi dari fib Model Code 2020; ACI 562, 2021; ISO 13823,2020; dan R. E. Melchers and A. T. Beck, 2018).

Konsep desain repair beton berbasis umur layanan (*service life-based repair design*), yang menjadi pendekatan utama dalam teknologi repair beton modern. Pendekatan ini menempatkan repair beton sebagai intervensi strategis yang dirancang untuk mencapai umur layanan target tertentu, bukan sekadar memulihkan kondisi struktur pada saat ini.

Diagram menunjukkan bahwa proses desain dimulai dari diagnosis mekanisme kerusakan dan kondisi eksisting struktur, termasuk tingkat korosi, penetrasi klorida, karbonasi, dan kondisi retak. Informasi ini kemudian digunakan untuk memilih sistem repair yang sesuai, baik dari sisi material, metode pelaksanaan, maupun sistem proteksi tambahan.

Selanjutnya, sistem repair dievaluasi berdasarkan kemampuannya mengendalikan laju degradasi dan memperpanjang umur layanan struktur hingga mencapai target yang ditetapkan. Pendekatan ini umumnya memanfaatkan model kuantitatif seperti difusi klorida, laju karbonasi, dan kinetika korosi tulangan, yang dapat dikombinasikan dengan pendekatan probabilistik untuk mengakomodasi ketidakpastian material dan lingkungan.

Gambar ini menegaskan bahwa desain repair beton tidak boleh bersifat reaktif dan jangka pendek, melainkan harus dirancang sebagai bagian dari manajemen siklus hidup struktur. Dengan pendekatan berbasis umur layanan, engineer dapat membandingkan berbagai opsi repair secara rasional berdasarkan kinerja jangka panjang dan biaya siklus hidup, sehingga solusi yang dipilih lebih andal, ekonomis, dan berkelanjutan.

4.6 Pemilihan Material Repair Berdasarkan Desain

Pemilihan material repair merupakan hasil akhir dari proses desain, bukan titik awal. Material harus dipilih berdasarkan:

Mekanisme kerusakan dominan, Kondisi lingkungan, Target umur layanan, dan Keterbatasan pelaksanaan

4.7 Detail Desain dan Pelaksanaan Repair

Detail desain seperti persiapan permukaan, ketebalan minimum repair, sistem penjangkaran, dan urutan pelaksanaan sering menjadi faktor penentu keberhasilan repair. Banyak kegagalan repair terjadi bukan karena desain konseptual yang salah, melainkan karena detail pelaksanaan yang diabaikan (Xu, L.Y., et al., 2025; Zhang, P., et al., 2025).

4.8 Evaluasi Risiko dan Kegagalan Repair

Desain repair beton harus memasukkan analisis risiko kegagalan, meliputi debonding, retak ulang, korosi lanjutan, dan perubahan fungsi struktur. Pendekatan berbasis risiko memungkinkan penerapan strategi mitigasi yang lebih tepat dan efisien (ACI 546, 2021; Courard, L., et al., 2020).

4.9 Desain Repair Berbasis Compatibility

4.9.1 Konsep Dasar Compatibility-Based Repair Design (Kuantitatif)

Desain repair beton berbasis kompatibilitas menuntut **kesesuaian perilaku deformasi** antara beton eksisting dan material repair. Ketidakcocokan (mismatch) akan memicu **tegangan internal, debonding**, atau **retak ulang**, meskipun kuat tekan material tinggi.

Kompatibilitas dievaluasi pada tiga domain utama:

1. Mekanik (modulus & kekuatan)
2. Shrinkage (susut)
3. Termal (muai)

4.9.2 Model Tegangan Akibat Ketidakcocokan Modulus Elastisitas

Model Sederhana Tegangan Antar-Muka

Untuk sistem dua material (beton lama-repair) yang terkait sempurna, tegangan akibat perbedaan modulus dapat didekati:

$$\sigma_r = E_r \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_r) \quad (4-1)$$

dengan:

- σ_r = tegangan pada material repair
- E_r = modulus elastisitas material repair
- ε_s = regangan beton eksisting
- ε_r = regangan bebas material repair

Contoh Hitungan - Mismatch Modulus

Data:

- Beton eksisting: $E_s = 25 \text{ Gpa}$
- Repair mortar kaku: $E_r = 40 \text{ Gpa}$
- Regangan beban beton eksisting: $\varepsilon_s = 400 \mu\varepsilon$
- Regangan beton repair: $\varepsilon_r = 250 \mu\varepsilon$

$$\sigma_r = 40,000 \times (400 - 250) \times 10^{-6}$$

$$\sigma_r = 6,0 \text{ Mpa}$$

Interpretasi

- Tegangan tarik 6 MPa > kuat tarik repair mortar
 $\Rightarrow$ Retak / debonding sangat mungkin
 $\Rightarrow$ Solusi: pilih repair dengan $E_r \approx E_s$ (ECC / polymer-modified)

4.9.3 Model Shrinkage-Induced Stress

Tegangan Akibat Shrinkage Terkekang

Shrinkage material repair yang terhambat beton eksisting menghasilkan tegangan:

$$\sigma_{sh} = E_r \cdot \varepsilon_{sh} \quad (4-2)$$

dengan:

- ε_{sh} = strain susut total

Contoh Hitungan Shrinkage

Data:

- Repair mortar konvensional: $\varepsilon_{sh} = 600 \mu\varepsilon$
- $E_r = 60 \text{ GPa}$

$$\sigma_{sh} = 30,000 \times 600 \times 10^{-6} = 18 \text{ Mpa}$$

Makna teknik

$\Rightarrow$ Retak dini hampir pasti

4.3.3 Perbandingan Material (Shrinkage Stress)

Material	ε_{sh} ($\mu\varepsilon$)	E_r (GPa)	σ_{sh} (Mpa)
Mortar OPC	600	30	18
Polymer-Modified	300	20	6
ECC	100	18	1,8
Geopolymer	150	22	3,3

4.9.4 Model Tegangan Akibat Perbedaan Muai Termal

Persamaan Dasar

$$\sigma_T = E_r \cdot (\alpha_r - \alpha_s) \cdot \Delta T \quad (4-3)$$

dengan:

- α = koefisien muai termal
- ΔT = perubahan temperature

Contoh Hitungan Termal

Data:

- Beton eksisting: $\alpha_s = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Epoxy repair: $\alpha_r = 50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- $E_r = 35 \text{ GPa}$
- $\Delta T = 30^\circ\text{C}$

$$\sigma_T = 35,00 \times (40 \times 10^{-6}) \times 30$$

$$\sigma_T = 42 \text{ Mpa}$$

Interpretasi

- Tegangan sangat besar
⇒ Epoxy **tidak cocok** untuk repair volume besar

4.9.5 Kriteria Kuantitatif Compatibility (Design Check)

Agar repair aman:

$$\sigma_{total} = \sigma_r + \sigma_{sh} + \sigma_T < f_{t,r} \quad (4-4)$$

dimana:

- $f_{t,r}$ = kuat tarik material repair

4.9.6 Contoh Design Check Lengkap

Komponen Tegangan	Nilai (MPa)
Modulus mismatch	2,0
Shrinkage	1,8
Termal	0,9
Total	4,7

Jika:

- $f_{t,r} = 6,0$ MPa
⇒ DESAIN AMAN

BAB 5

MATERIAL REPAIR BETON KONVENSIONAL

Material repair beton konvensional yang hingga saat ini masih menjadi tulang punggung dalam praktik perbaikan struktur beton di berbagai sektor infrastruktur. Meskipun material inovatif seperti ECC, geopolimer, dan material rendah karbon berkembang pesat, material konvensional tetap mendominasi aplikasi lapangan karena ketersediaan luas, kemudahan aplikasi, biaya relatif terkendali, serta kesesuaiannya dengan standar internasional yang mapan.

Pemahaman menyeluruh terhadap karakteristik mekanik, fisik, dan durabilitas material repair konvensional menjadi prasyarat penting untuk memastikan bahwa sistem repair yang diterapkan benar-benar kompatibel dengan beton eksisting dan mampu mencapai target umur layanan yang direncanakan.

5.1 Klasifikasi Material Repair Beton Konvensional

Material repair beton konvensional umumnya diklasifikasikan berdasarkan komposisi bahan pengikat dan mekanisme kerja dalam sistem repair, meliputi:

1. Mortar dan beton repair berbasis semen Portland
2. Material berbasis semen modifikasi polimer (polymer-modified cementitious materials)
3. Material berbasis resin dan epoksi
4. Material grouting semen dan non-semen

Klasifikasi ini penting karena setiap kelompok material memiliki perilaku mekanik, kompatibilitas, dan keterbatasan aplikasi yang berbeda. Pemilihan material yang tidak sesuai dengan mekanisme

kerusakan dominan sering menjadi penyebab kegagalan repair dini.

Tabel 5.1. Klasifikasi Material Repair Beton Konvensional

Jenis Material	Pengikat Utama	Aplikasi Umum	Karakteristik Kunci
Mortar semen	OPC	Patch repair	Kompatibel, ekonomis
Semen + polimer	OPC + lateks	Overlay tipis	Adhesi tinggi
Resin/epoksi	Resin sintetis	Crack injection	Kedap air
Grout semen	OPC non-shrink	Recasting	Flowability tinggi

Tabel ini menunjukkan hubungan antara jenis material repair, aplikasi umum, dan karakteristik utama yang harus dipertimbangkan dalam tahap desain dan pelaksanaan repair beton.

5.2 Mortar dan Beton Repair Berbasis Semen Portland

Mortar dan beton repair berbasis semen Portland merupakan material repair paling umum digunakan dalam perbaikan struktur beton. Material ini memiliki kompatibilitas kimia yang sangat baik dengan beton eksisting karena kesamaan sistem hidrasi dan produk reaksi.

Karakteristik utama material ini meliputi: Kuat tekan sedang hingga tinggi, Modulus elastisitas relatif mendekati beton eksisting, dan Perilaku termal yang serupa dengan beton lama

Keunggulan utama material ini adalah kemudahan integrasi struktural, sehingga cocok untuk perbaikan elemen beton bertulang konvensional. Namun, material ini juga memiliki

keterbatasan berupa: Shrinkage relatif tinggi, Permeabilitas masih signifikan, dan Ketahanan terbatas terhadap lingkungan agresif

Oleh karena itu, desain repair berbasis mortar semen Portland harus disertai kontrol curing yang ketat, penggunaan aditif, serta detail pelaksanaan yang baik untuk mencegah retak dini dan debonding.



Gambar 5.1. Skema hubungan antara jenis material repair beton konvensional, mekanisme kerja, dan fungsi aplikatifnya dalam perbaikan struktur beton (diadaptasi dari ACI 546R, 2021; EN 1504, 2020; Neville, dan Mehta & Monteiro).

Kerangka konseptual material repair beton konvensional yang menghubungkan jenis material, mekanisme kerja, dan fungsi aplikatif dalam sistem perbaikan struktur beton. Diagram ini menegaskan bahwa material repair konvensional tidak bersifat universal, melainkan dirancang untuk tujuan dan kondisi kerusakan tertentu.

Material berbasis semen Portland ditunjukkan sebagai sistem repair yang paling kompatibel secara kimia dan termal dengan beton eksisting, sehingga banyak digunakan untuk patch repair struktural dan recasting elemen beton. Mekanisme kerjanya

mengandalkan hidrasi semen untuk memulihkan integritas beton, namun rentan terhadap shrinkage dan retak dini bila curing tidak terkendali.

Material semen modifikasi polimer ditampilkan sebagai pengembangan dari mortar semen konvensional, dengan mekanisme peningkatan kuat lekat dan fleksibilitas melalui fase polimer. Material ini umum diaplikasikan pada overlay tipis dan perbaikan permukaan, terutama ketika pengendalian permeabilitas dan ketahanan terhadap siklus basah–kering menjadi prioritas.

Material berbasis resin/epoksi bekerja melalui mekanisme ikatan kimia cepat dan kedap air, sehingga sangat efektif untuk *crack injection* dan *bonding agent*. Namun, gambar ini juga mengindikasikan keterbatasan resin terkait kompatibilitas deformasi dan termal pada aplikasi berskala besar.

Secara keseluruhan, Gambar 5.1 menegaskan bahwa keberhasilan repair beton konvensional sangat ditentukan oleh kecocokan antara mekanisme kerja material dan fungsi aplikatifnya, sesuai dengan prinsip compatibility-based repair design.

5.3 Material Repair Berbasis Semen Modifikasi Polimer

Material repair berbasis semen modifikasi polimer dikembangkan untuk meningkatkan kinerja mortar semen konvensional, khususnya dari sisi adhesi dan ketahanan terhadap lingkungan. Penambahan polimer, seperti lateks styrene-butadiene atau resin akrilik, menghasilkan struktur mikro yang lebih rapat dan fleksibel.

Keunggulan utama material ini meliputi: Kuat lekat tinggi terhadap beton eksisting, Shrinkage lebih rendah, dan Ketahanan lebih baik terhadap siklus basah–kering

Material ini banyak digunakan pada patch repair tipis, overlay, dan perbaikan permukaan, terutama pada struktur yang memerlukan ketahanan lebih tinggi terhadap penetrasi air.

Namun, material ini relatif sensitif terhadap kondisi curing dan temperatur aplikasi, sehingga desain repair harus mempertimbangkan kondisi lingkungan lapangan secara cermat.

Tabel 5.2. Perbandingan Mortar Semen Konvensional dan Semen Modifikasi Polimer

Parameter	Semen Konvensional	Semen Modifikasi Polimer
Adhesi	Sedang	Tinggi
Shrinkage	Tinggi	Lebih rendah
Permeabilitas	Sedang	Rendah
Fleksibilitas	Rendah	Lebih tinggi

Tabel ini menegaskan bahwa modifikasi polimer meningkatkan kinerja mortar repair, khususnya untuk aplikasi yang menuntut adhesi dan ketahanan lingkungan lebih baik.

5.4 Material Repair Berbasis Resin dan Epoksi

Material berbasis resin, khususnya epoksi, banyak digunakan pada aplikasi repair yang memerlukan kuat lekat sangat tinggi dan kekedapan terhadap air, seperti crack injection dan bonding agent.

Karakteristik utama material resin meliputi: Kuat tarik dan adhesi sangat tinggi, Permeabilitas sangat rendah dan Waktu pengerasan cepat

Namun demikian, material resin memiliki modulus elastisitas tinggi dan koefisien muai termal yang berbeda dari beton, sehingga berpotensi menimbulkan incompatibility pada aplikasi berskala

besar. Oleh karena itu, penggunaannya harus dibatasi pada zona lokal dan retak struktural tertentu.

5.5 Material Grouting untuk Repair dan Recasting

Material grouting digunakan untuk mengisi rongga, celah, dan ruang kosong pada struktur beton. Grout semen non-shrink merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena mampu mengalir dengan baik tanpa mengalami penyusutan signifikan.

Karakteristik penting material grouting meliputi: Flowability tinggi, Shrinkage sangat rendah dan Kuat tekan memadai

Material ini banyak digunakan pada pekerjaan recasting, perbaikan fondasi, dan bantalan peralatan, di mana transfer beban menjadi aspek utama.



Gambar 5.2. Klasifikasi dan karakteristik utama material repair beton konvensional berdasarkan komposisi, mekanisme kerja, dan aplikasi lapangan (diadaptasi dari ACI 546R, EN 1504, Neville, dan fib Model Code 2020)

Klasifikasi material repair beton konvensional yang hingga saat ini masih paling luas digunakan dalam praktik perbaikan struktur beton. Material tersebut dikelompokkan berdasarkan komposisi

utama, mekanisme kerja, dan fungsi aplikatif di lapangan, sehingga memudahkan engineer dalam memilih sistem repair yang sesuai dengan kondisi kerusakan dan tuntutan kinerja.

Kelompok pertama adalah mortar dan beton repair berbasis semen Portland, yang memiliki kompatibilitas kimia dan termal yang baik dengan beton eksisting serta mudah diaplikasikan. Material ini umumnya digunakan untuk patch repair struktural dan recasting elemen beton, namun memiliki keterbatasan berupa shrinkage relatif tinggi dan permeabilitas yang masih signifikan.

Kelompok kedua adalah material berbasis semen modifikasi polimer, yang dirancang untuk meningkatkan kuat lekat, fleksibilitas, dan ketahanan terhadap penetrasi air. Material ini banyak digunakan untuk overlay tipis dan perbaikan permukaan, terutama pada kondisi di mana ketahanan terhadap siklus basah-kering diperlukan.

Kelompok berikutnya adalah material berbasis resin dan epoksi, yang menawarkan kuat lekat dan kekedapan sangat tinggi. Material ini umum diaplikasikan pada crack injection dan bonding agent, namun memerlukan perhatian khusus terhadap kompatibilitas termal dan deformasi.

Terakhir, material grouting konvensional digunakan untuk pengisian rongga dan transfer beban, dengan karakteristik flowability tinggi dan shrinkage sangat rendah.

Secara keseluruhan, Gambar 5.2 menegaskan bahwa material repair beton konvensional memiliki peran penting namun bersifat spesifik aplikasi, sehingga pemilihannya harus selalu dikaitkan dengan mekanisme kerusakan, kondisi lingkungan, serta prinsip kompatibilitas dan durabilitas.

5.6 Kriteria Pemilihan Material Repair Konvensional

Pemilihan material repair konvensional harus mengacu pada prinsip desain repair beton, dengan mempertimbangkan: Mekanisme kerusakan dominan

- Kompatibilitas material
- Kondisi lingkungan
- Metode pelaksanaan
- Umur layanan target

Pendekatan berbasis kinerja dan biaya siklus hidup sangat dianjurkan untuk memastikan efektivitas jangka panjang.

5.7 Keterbatasan Material Repair Konvensional

Meskipun masih luas digunakan, material repair konvensional memiliki keterbatasan dalam menghadapi tuntutan durabilitas jangka panjang, khususnya pada lingkungan ekstrem. Permeabilitas relatif tinggi dan potensi shrinkage menjadi tantangan utama yang mendorong berkembangnya material repair inovatif.

5.8 Parameter Material Repair Beton

Modulus Elastisitas E, Shrinkage, dan Permeability: Model & Contoh Hitung

5.8.1 Peran Parameter Material dalam Keberhasilan Repair

Keberhasilan repair beton ditentukan oleh parameter material, bukan semata kuat tekan. Tiga parameter kunci yang mengontrol kompatibilitas dan durabilitas adalah:

1. **Modulus elastisitas (E)** → kompatibilitas mekanik
2. **Shrinkage (ϵ_{sh})** → risiko retak/debonding
3. **Permeability (k / D)** → ketahanan jangka panjang (klorida, air)

Pendekatan desain modern mensyaratkan **target numerik** untuk ketiga parameter ini.

5.8.2 Modulus Elastisitas (E)

Definisi & Model

Modulus elastisitas menentukan respons regangan terhadap tegangan:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (5-1)$$

Untuk beton semen:

$$E_c \approx 4700 \sqrt{f_c^l} \text{ (MPa)}$$

(ACI 318)

Nilai Tipikal E (Material Repair)

Material	f_c^l (MPa)	E (GPa)
Beton eksisting (mutu sedang)	30	25-28
Mortar OPC	40	30-35
Polymer-modified mortar	30-40	18-25
ECC	30-50	15-20
Geopolymer	35-50	20-30
Epoxy	-	30-45

Target desain kompatibilitas:

$$0,8E_s \leq \downarrow \leq 1,2E_s$$

Contoh Hitung – Seleksi E

- Beton eksisting: $E_s = 26 \text{ GPa}$
- Opsi A (OPC): $E_s = 34 \text{ GPa} \rightarrow$ tidak kompatibel
- Opsi B (ECC): $E_r = 18 \text{ GPa} \rightarrow$ kompatibel

$\Rightarrow$ Pilih ECC

5.8.3 Shrinkage (ϵ_{sh})

Model Shrinkage Total

Shrinkage total:

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{dry} + \epsilon_{aut} \quad (5-2)$$

Tegangan shrinkage terkekang:

$$\sigma_{sh} = E_f \cdot \epsilon_{sh} \quad (5-3)$$

Nilai Tipikal Shrinkage

Material	$\epsilon_{sh}(\mu\epsilon)$
Mortar OPC	500-800
Polymer-modified	250-400
ECC	50-150
Geopolymer	100-300
UHPC	200-400

Contoh Hitung - Tegangan Shrinkage

- Mortar OPC: $\epsilon_{sh} = 600 \mu\epsilon$. $E = 30 \text{ GPa}$
 $\sigma_{sh} = 18 \text{ MPa} (> f_t) \Rightarrow \text{retak}$
- ECC: $\epsilon_{sh} = 100 \mu\epsilon$. $E = 18 \text{ GPa}$
 $\sigma_{sh} = 1,8 \text{ MPa} \Rightarrow \text{aman}$

5.8.4 Permeability & Difusivitas

Hubungan Permeability-Durabilitas

Permeability mengontrol penetrasi air/klorida. Untuk klorida digunakan difusivitas D_{cl} . Model penetrasi (Bab 2):

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t}} \right) \right] \quad (5-4)$$

Nilai Tipikal Permeability/Difusivitas

Material	$D_{cl} \text{ (m}^2/\text{s)}$
Beton OPC	$1 \times 10^{-12} - 5 \times 10^{-12}$
Polymer-modified	$5 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-12}$
ECC	$1 \times 10^{-13} - 5 \times 10^{-13}$
Geopolymer	$1 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-12}$
UHPC	$\leq 1 \times 10^{-13}$

Contoh Hitung - Dampak Permeability

- Selimut = 40 mm
- Ambang klorida tercapai:
- OPC ($D = 2 \times 10^{-12}$) $\rightarrow \sim 5$ tahun

- ECC ($D = 2 \times 10^{-13}$) $\rightarrow \sim 50$ tahun

Penurunan D 10x $\Rightarrow$ umur naik ~ 10 x

5.8.5 Indeks Kinerja Material Repair (MPI)

Untuk seleksi cepat, definisikan Material Performance Index (MPI):

$$MPI = \frac{f_t}{E_r \cdot \varepsilon_{sh} \cdot D_{cl}} \quad (5-5)$$

Semakin besar $\rightarrow$ semakin baik.

Material	MPI (relatif)
OPC mortar	1,0
Polymer-modified	3-4
ECC	10-15
Geopolymer	6-8

5.8.6 Contoh Desain Terpadu (E + ε_{sh} + D)

Dalam perancangan material repair beton modern, pendekatan yang hanya mempertimbangkan satu parameter material seringkali tidak cukup untuk menjamin kinerja jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan desain terpadu yang mempertimbangkan interaksi antara beberapa parameter kunci material, yaitu modulus elastisitas (E), regangan susut (ε_{sh}), dan koefisien difusi klorida (D). Ketiga parameter ini berperan penting dalam menentukan kompatibilitas mekanik antara material repair dan beton eksisting, stabilitas dimensi material, serta ketahanan terhadap penetrasi zat agresif.

Pendekatan desain terpadu ini bertujuan untuk memastikan bahwa material repair tidak hanya memiliki kekuatan yang memadai, tetapi juga mampu berinteraksi secara kompatibel dengan substrat beton lama serta memiliki ketahanan durabilitas yang tinggi.

Kriteria Desain

Beberapa kriteria dasar yang digunakan dalam desain terpadu material repair meliputi:

1. Kompatibilitas modulus elastisitas

Modulus elastisitas material repair (E_r) sebaiknya mendekati modulus elastisitas beton eksisting (E_s), sehingga:

$$E_r \approx E_s$$

Kesamaan nilai modulus ini penting untuk mencegah ketidaksesuaian deformasi (strain incompatibility) antara lapisan repair dan beton lama. Jika modulus material repair terlalu tinggi, maka lapisan repair akan menjadi terlalu kaku dan berpotensi mengalami retak akibat konsentrasi tegangan. Sebaliknya, jika modulus terlalu rendah, deformasi berlebih dapat terjadi sehingga menyebabkan pelepasan (debonding) dari substrat beton.

2. Kontrol regangan susut

Regangan susut material repair harus dijaga agar tidak menghasilkan tegangan tarik yang melebihi kapasitas tarik material. Oleh karena itu digunakan kriteria:

$$\sigma_{sh} < 0.5f_t$$

di mana σ_{sh} adalah tegangan akibat susut dan f_t adalah kuat tarik material. Batas ini digunakan untuk memastikan bahwa susut tidak

menyebabkan retak awal pada material repair. Pengendalian susut menjadi sangat penting karena retak yang terjadi pada tahap awal dapat menjadi jalur masuk bagi air, karbon dioksida, dan ion klorida.

3. Ketahanan terhadap difusi klorida

Untuk memastikan durabilitas terhadap lingkungan agresif, khususnya pada struktur yang terpapar klorida seperti jembatan atau struktur pesisir, koefisien difusi klorida harus dijaga pada tingkat yang sangat rendah. Dalam contoh desain ini digunakan kriteria:

$$D_{cl} \leq 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa material memiliki mikrostruktur yang cukup rapat untuk menghambat penetrasi ion klorida dan memperlambat proses korosi tulangan.

BAB 6

MATERIAL REPAIR BETON INOVATIF

Material repair beton inovatif yang dikembangkan untuk menjawab keterbatasan material repair konvensional, khususnya dalam hal kontrol retak, kompatibilitas deformasi, durabilitas jangka panjang, dan keberlanjutan lingkungan. Sejalan dengan tuntutan infrastruktur modern dan target penurunan emisi karbon global, material repair inovatif kini tidak hanya dinilai dari kinerja mekaniknya, tetapi juga dari kontribusinya terhadap reduksi emisi CO₂ dan biaya siklus hidup (Li, V.C., 2023; Xu, L.Y., et al., 2025; Gálvez, J.C., et al., 2022).

Material inovatif seperti Engineered Cementitious Composites (ECC), geopolimer, dan low-carbon repair materials merepresentasikan pergeseran paradigma teknologi repair beton: dari pendekatan “memperbaiki kerusakan” menuju mengelola kinerja dan durabilitas struktur secara berkelanjutan.

6.1 Latar Belakang Pengembangan Material Repair Inovatif

Material repair konvensional berbasis semen Portland masih menghadapi berbagai keterbatasan, antara lain: Shrinkage dan retak ulang pada umur dini, Permeabilitas relatif tinggi terhadap klorida dan karbonasi, Ketahanan terbatas pada lingkungan kimia agresif, dan Jejak karbon tinggi akibat penggunaan klinker semen.

Di sisi lain, sektor konstruksi dituntut berkontribusi dalam pengurangan emisi karbon global. Tantangan teknis dan lingkungan ini mendorong pengembangan material repair inovatif dengan pendekatan berikut: Peningkatan daktilitas dan kontrol retak, Perbaikan mikrostruktur dan durabilitas, dan Reduksi kandungan klinker dan emisi CO₂.

Tabel 6.1. Keterbatasan Material Repair Konvensional dan Solusi Material Inovatif

Isu Utama	Material Konvensional	Solusi Material Inovatif
Kontrol retak	Retak makro	Retak mikro (ECC)
Permeabilitas	Sedang-tinggi	Sangat rendah
Ketahanan kimia	Terbatas	Tinggi (geopolymer)
Emisi CO ₂	Tinggi	Rendah (low-carbon)

Tabel ini menegaskan bahwa material inovatif dikembangkan secara spesifik untuk mengatasi kelemahan fundamental material repair konvensional.

6.2 Engineered Cementitious Composites (ECC) untuk Repair Beton

Engineered Cementitious Composites (ECC) merupakan material semen berserat yang dirancang berdasarkan prinsip *micromechanics-based design*. Berbeda dengan beton normal yang mengalami *strain-softening*, ECC menunjukkan *strain-hardening* dengan pembentukan **retak** mikro berlebar sangat kecil (<100 μm), (Li, V.C., 2020; Huang, B.T., et al., 2023; Yu, K., et al., 2023).

Karakteristik unggul ECC meliputi: Daktilitas tarik hingga 3–5%, Lebar retak terkendali dan tersebar merata, Kuat lekat tinggi terhadap beton eksisting, dan Ketahanan unggul terhadap klorida, karbonasi, dan siklus basah–kering.

Dalam aplikasi repair beton, ECC banyak digunakan untuk: Overlay tipis struktural, Patch repair pada zona tarik, dan Perbaikan retak aktif dan zona deformasi tinggi.

Lebar retak mikro yang sangat kecil memungkinkan terjadinya *self-healing* autogenous, sehingga durabilitas jangka panjang ECC

dalam sistem repair menjadi sangat tinggi (Li, V.C., et al., 2021; Sisomphon, K., et al., 2022)



Gambar 6.1. Peta evolusi material repair beton dari material konvensional berbasis semen Portland menuju material inovatif berkinerja tinggi dan rendah karbon (diadaptasi dari Scrivener et al., Pacheco-Torgal et al., Xu et al., dan fib Model Code 2020)

Evolusi material repair beton yang berkembang seiring meningkatnya tuntutan durabilitas, kompatibilitas deformasi, dan keberlanjutan lingkungan. Pada tahap awal, teknologi repair beton didominasi oleh mortar dan beton berbasis semen Portland konvensional, yang relatif mudah diaplikasikan dan kompatibel secara kimia, namun memiliki keterbatasan dalam hal shrinkage, permeabilitas, dan ketahanan jangka panjang pada lingkungan agresif.

Seiring berkembangnya kebutuhan akan repair berkinerja lebih tinggi, muncul material modifikasi polimer dan sistem berbasis resin, yang menawarkan peningkatan kuat lekat dan kedap air, tetapi masih menghadapi isu kompatibilitas termal dan dampak lingkungan. Tahap berikutnya ditandai oleh pengembangan

material inovatif, seperti Engineered Cementitious Composites (ECC), geopolimer, dan low-carbon repair materials, yang dirancang untuk mengendalikan retak, meningkatkan durabilitas, serta menurunkan emisi karbon secara signifikan.

Gambar ini menegaskan bahwa arah perkembangan material repair beton modern tidak lagi berfokus pada peningkatan kuat tekan semata, melainkan pada kinerja terintegrasi, mencakup daktilitas, kontrol retak, ketahanan kimia, dan kontribusi terhadap target dekarbonisasi sektor konstruksi. Dalam konteks repair beton, evolusi ini memungkinkan pergeseran dari solusi jangka pendek menuju strategi perbaikan berbasis umur layanan dan keberlanjutan jangka panjang.

Secara konseptual, Gambar 6.1 berfungsi sebagai kerangka pemahaman makro yang menjelaskan mengapa material repair inovatif menjadi semakin relevan dan diperlukan dalam praktik repair beton modern.

6.3 Geopolymer sebagai Material Repair Beton

Geopolymer merupakan material pengikat alternatif yang dihasilkan melalui aktivasi alkali material aluminosilikat seperti fly ash, slag, dan metakaolin. Tidak seperti semen Portland, geopolimer tidak memerlukan proses kalsinasi klinker, sehingga emisi CO₂-nya jauh lebih rendah (Provis, J.L., van Deventer, J.S.J., 2020; L. J. Gardner *et al.*, 2021; Davidovits, J., 2020).

Keunggulan geopolimer untuk aplikasi repair beton meliputi: Ketahanan sangat baik terhadap serangan sulfat dan asam, Permeabilitas rendah, dan Kinerja baik pada lingkungan suhu tinggi.

Studi terbaru menunjukkan bahwa mortar geopolimer memiliki kuat lekat dan kompatibilitas yang baik dengan beton eksisting, sehingga cocok untuk repair struktur di lingkungan industri, laut, dan sistem sanitasi.

Tantangan utama geopolimer terletak pada: Variabilitas bahan baku, Sensitivitas terhadap metode curing, dan Keterbatasan standar teknis di beberapa negara.

Tabel 6.2. Perbandingan Geopolymer dan Semen Portland untuk Repair Beton

Parameter	Semen Portland	Geopolymer
Emisi CO ₂	Tinggi	Rendah
Ketahanan asam	Rendah	Sangat tinggi
Shrinkage	Sedang	Rendah
Kompatibilitas	Baik	Baik-sangat baik

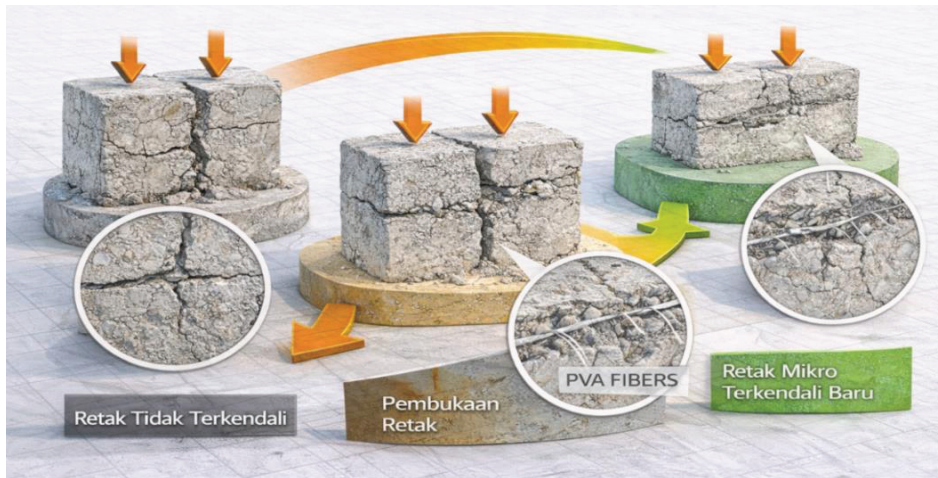
Tabel ini menunjukkan potensi geopolimer sebagai material repair unggul pada lingkungan agresif dan berorientasi keberlanjutan.

6.4 Material Repair Beton Rendah Karbon (Low-Carbon Repair)

Material repair beton rendah karbon dikembangkan dengan mengurangi kandungan semen Portland melalui substitusi bahan tambahan seperti slag, fly ash, limestone powder, dan calcined clay. Pendekatan ini sejalan dengan konsep eco-efficient cementitious materials dan ekonomi sirkular.

Low-carbon repair materials menunjukkan: Penurunan emisi CO₂ hingga **40–70%**, Kinerja mekanik yang kompetitif, dan Ketahanan jangka panjang terhadap klorida dan karbonasi.

Material ini sangat relevan untuk proyek infrastruktur besar, di mana dampak lingkungan kumulatif menjadi pertimbangan utama.



Gambar 6.2. Mekanisme kerja Engineered Cementitious Composites (ECC) dalam mengendalikan retak mikro dan meningkatkan kompatibilitas deformasi pada repair beton (diadaptasi dari Li, Li & Leung, Yu et al., dan fib Model Code 2020).

Mekanisme *fundamental Engineered Cementitious Composites (ECC)* yang membedakannya dari beton dan mortar repair konvensional. Pada saat pembebanan tarik atau lentur, ECC tidak mengalami retak tunggal lebar seperti beton normal, melainkan menunjukkan perilaku strain-hardening dengan terbentuknya *banyak retak mikro (multiple microcracking)* yang terdistribusi merata.

Lebar retak mikro pada ECC umumnya berada di bawah $100\ \mu\text{m}$, sehingga secara signifikan membatasi penetrasi air, klorida, dan karbon dioksida. Kondisi ini meningkatkan durabilitas jangka panjang dan memungkinkan terjadinya *autogenous self-healing*, di mana retak mikro dapat tertutup kembali melalui presipitasi kalsium karbonat atau reaksi hidrasi lanjutan.

Dalam konteks repair beton, mekanisme ini sangat penting karena ECC memiliki kompatibilitas deformasi yang tinggi dengan beton eksisting. Ketika digunakan sebagai overlay atau patch repair, ECC mampu mengakomodasi deformasi akibat beban, susut, dan temperatur tanpa memicu debonding atau retak ulang yang signifikan. Hal ini menjadikan ECC sangat efektif untuk repair zona retak aktif, perbaikan struktural tipis, dan aplikasi durabilitas tinggi.

Secara konseptual, Gambar 6.2 menegaskan bahwa keunggulan utama ECC dalam repair beton terletak pada pengendalian retak berbasis mekanisme material, bukan semata-mata peningkatan kuat tekan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip compatibility-based dan durability-oriented repair design.

6.5 Kompatibilitas dan Desain Material Repair Inovatif

Meskipun memiliki kinerja unggul, material repair inovatif tetap harus memenuhi prinsip kompatibilitas mekanik, termal, dan kimia. ECC dengan modulus elastisitas moderat dan geopolymer dengan shrinkage rendah umumnya menunjukkan kompatibilitas yang baik terhadap beton eksisting.

Desain repair berbasis material inovatif harus mempertimbangkan: Interaksi zona transisi antar muka (ITZ), Perilaku deformasi jangka panjang, dan Metode aplikasi dan curing spesifik.

6.6 Aspek Keberlanjutan dan Life Cycle Assessment

Evaluasi keberlanjutan material repair inovatif umumnya dilakukan melalui Life Cycle Assessment (LCA) dan Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Berbagai studi menunjukkan bahwa meskipun biaya awal material inovatif lebih tinggi, biaya siklus

hidup total sering kali lebih rendah akibat durabilitas yang lebih baik dan berkurangnya kebutuhan repair ulang.

Tabel 6.3. Perbandingan Biaya Awal dan Biaya Siklus Hidup Repair Beton

Jenis Material	Biaya Awal	Biaya Siklus Hidup
Konvensional	Rendah	Tinggi
Inovatif	Sedang-tinggi	Rendah

6.7 Tantangan Implementasi di Lapangan

Implementasi material repair inovatif masih menghadapi tantangan, antara lain: Keterbatasan standar dan regulasi, Kesiapan tenaga kerja dan metode pelaksanaan, dan Variabilitas bahan baku (khususnya geopolymer).

Oleh karena itu, penerapan material inovatif harus disertai desain matang, pengujian pendahuluan, dan kontrol mutu yang ketat.

6.8 Parameter Kuantitatif ECC & Geopolimer

Model Strain-Hardening, Kontrol Retak, dan Implikasi Repair Beton

6.8.1 Mengapa ECC & Geopolymer Perlu Pendekatan Kuantitatif

Berbeda dengan material repair konvensional yang berperilaku *strain-softening*, ECC dan geopolymer dirancang untuk:

- mengendalikan **regangan pasca-retak**,
- menurunkan **tegangan kompatibilitas** (Bab 4),
- dan memperpanjang *Remaining Service Life* (Bab 3).

Oleh karena itu, kinerja material ini harus dianalisis melalui model σ - ϵ , bukan kuat tekan saja.

6.8.2 Model Tegangan-Regangan ECC (Strain-Hardening)

Kurva Tegangan-Regangan ECC

ECC menunjukkan **strain-hardening tensile behavior**, dengan ciri:

- Retak pertama pada σ_{cr}
- Diikuti peningkatan tegangan hingga σ_{tu}
- Dengan regangan tarik ultimit ϵ_{tu} sangat besar.

Model sederhana:

$$\sigma_t = \begin{cases} E_m \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_{cr} \\ \sigma_{cr} + k(\epsilon - \epsilon_{cr}) & \epsilon_{cr} < \epsilon \leq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (6-1)$$

6.8.3 Parameter Kuantitatif ECC (Tipikal)

Parameter	Beton Normal	ECC
Modulus E (GPa)	25-30	15-20
Kuat tarik σ_{cr} (MPa)	2-3	3-5
Regangan tarik ultimit ϵ_{tu}	0,01%	1-3%
Lebar retak maks	>0,3 mm	<0,1 mm
Mode pasca-retak	Softening	Hardening

Makna teknik

ECC mampu menyesuaikan deformasi beron eksisting **tanpa konsentrasi tegangan**.

6.8.4 Kriteria Strain-Hardening (Micromechanics ECC)

Menurut Li (ECC theory), strain-hardening terjadi bila:

Kriteria Energi

$$J_{tip} \leq J_b \quad (6-2)$$

- J_{tip} = energi retak matriks
- J_b = energi jembatan serat

6.8.5 Contoh Hitungan Strain-Hardening ECC

Data ECC:

- $\sigma_{cr} = 3,5 \text{ MPa}$
- $\sigma_{fiber} = 5,0 \text{ MPa}$
- $J_{tip} = 20 \text{ J/m}^2$
- $J_b = 60 \text{ J/m}^2$



Kedua kriteria terpenuhi

ECC strain-hardening stabil

6.8.6 Model Kontrol Lebar Retak ECC

Lebar retak maksimum ECC:

$$w_{max} \approx \frac{\varepsilon_{tu} \cdot s}{n} \quad (6-3)$$

Dengan:

- s = panjang zona retak
- n = jumlah mikroretak

contoh:

- $\varepsilon_{tu} = 2\%$
- $s = 50\text{mm}$
- $n = 50$

$$w_{max} = \frac{0,02 \times 50}{50} = 0,02 \text{ mm}$$

Impikasi

- Retak mikro **tidak signifikan untuk difusi klorida**
- Self-healing **aktif**

6.8.7 Model Kuantitatif Geopolymer untuk Repair

Model Tegangan-Regangan Geopolymer

Geopolymer umumnya **strain-softening**, namun:

- Modulus lebih rendah dari OPC
- Shrinkage lebih kecil
- Ketahanan kimia sangat tinggi.

Pendekatan linear:

$$\sigma = E_g \varepsilon \quad (6-4)$$

Parameter Geopolymer (Tipikal)

Parameter	Nilai
Modulus E_g	20-30 GPa
Shrinkage ε_{sh}	100-300 $\mu\varepsilon$
Difusivitas klorida	$10^{-13} - 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Ketahanan asam/sulfat	Sangat tinggi

6.8.8 Contoh Hitungan Kompatibilitas Geopolymer

Data:

- Beton lama $E_s = 25 \text{ GPa}$
- Geopolymer $E_g = 22 \text{ GPa}$
- Shrinkage $\varepsilon_{sh} = 200 \mu\varepsilon$

$$\sigma_{sh} = E_g \varepsilon_{sh} = 22,000 \times 200 \times 10^{-6} = 4,4 \text{ MPa}$$

Jika $f_t = 6 \text{ MPa}$

⇒ **Masih aman**, risiko retak rendah

BAB 7

TEKNOLOGI REPAIR RETAK BETON

Retak beton merupakan bentuk kerusakan paling umum dan sering kali menjadi indikator awal degradasi struktur beton. Walaupun tidak selalu menyebabkan penurunan kapasitas struktural secara langsung, keberadaan retak berfungsi sebagai jalur masuk utama air, klorida, karbon dioksida, dan zat agresif lainnya, yang secara signifikan mempercepat proses karbonasi, korosi tulangan, dan degradasi durabilitas beton (Neville, A.M., 2014; Bentz, D.P., et al., 2020; Beushausen, H., Alexander, M., 2023)

Dalam konteks manajemen siklus hidup struktur, repair retak beton tidak hanya berfungsi sebagai tindakan korektif, tetapi juga sebagai strategi preventif untuk mengendalikan degradasi jangka panjang. Oleh karena itu, pemilihan teknologi repair retak beton harus dilakukan secara berbasis mekanisme kerusakan, karakteristik retak, dan tujuan kinerja pasca-repair.

7.1 Klasifikasi Retak Beton dan Implikasinya terhadap Repair

Retak beton dapat diklasifikasikan berdasarkan penyebab, lebar retak, dan aktivitas retak, yang masing-masing memiliki implikasi langsung terhadap strategi repair.

Berdasarkan penyebab, retak beton meliputi: Retak susut (*plastic dan drying shrinkage*), Retak termal, Retak struktural akibat beban, dan Retak akibat degradasi kimia seperti ASR dan sulfat.

Berdasarkan lebar retak, retak mikro ($<0,1$ mm) umumnya berdampak dominan pada durabilitas, sedangkan retak $>0,3$ mm sering kali berkaitan dengan isu struktural [4–6]. Selain itu, klasifikasi retak aktif (*moving cracks*) dan retak pasif (*dormant cracks*)

sangat krusial karena menentukan apakah sistem repair harus bersifat kaku atau fleksibel.

Tabel 7.1. Klasifikasi Retak Beton dan Implikasi Teknologi Repair

Jenis Retak	Lebar Retak	Sifat Retak	Implikasi Repair
Retak mikro	<0,1 mm	Pasif	Surface treatment, self-healing
Retak sedang	0,1-0,3 mm	Pasif/ Aktif	Injection, sealing
Retak lebar	>0,3 mm	Umumnya struktural	Injection + strengthening
Retak aktif	Variabel	Bergerak	PU injection, flexible sealant

Tabel ini menegaskan bahwa satu metode repair tidak dapat diterapkan untuk semua jenis retak, dan klasifikasi retak menjadi dasar utama pengambilan keputusan teknis.

7.2 Prinsip Dasar Repair Retak Beton

Prinsip dasar repair retak beton berfokus pada fungsi yang ingin dipulihkan, bukan sekadar menutup retak secara visual. Tujuan repair retak beton dapat meliputi: Pemulihan kontinuitas struktural, Pengendalian penetrasi zat agresif, Peningkatan durabilitas dan estetika, dan Pengendalian perkembangan retak di masa depan.

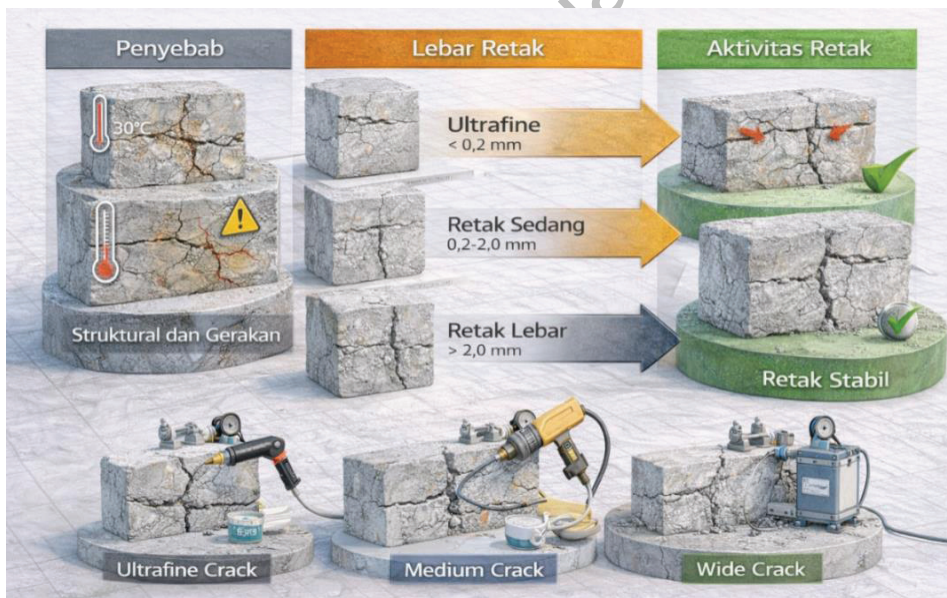
Studi terkini menunjukkan bahwa kegagalan repair retak beton sering terjadi akibat ketidaksesuaian antara sifat material repair dan perilaku retak, misalnya penggunaan epoxy kaku pada retak aktif.

7.3 Teknologi Crack Injection

Crack injection merupakan teknologi paling umum untuk repair retak beton, khususnya retak pasif. Prinsip metode ini adalah mengisi rongga retak secara penuh dengan material berkuat lekat tinggi sehingga kontinuitas beton dapat dipulihkan [10-12].

Jenis material injeksi yang umum digunakan: Epoxy injection → retak struktural pasif, Polyurethane (PU) injection → retak aktif dan kondisi basah, dan Microfine cement injection → retak lebar dan struktur masif.

Keberhasilan crack injection sangat dipengaruhi oleh: Kebersihan dan kekeringan retak, Viskositas material, dan Tekanan dan urutan injeksi.



Gambar 7.1. Klasifikasi retak beton berdasarkan penyebab, lebar retak, dan aktivitas retak serta implikasinya terhadap teknologi repair beton (*diadaptasi dari ACI 224R, Neville, EN 1504, dan fib Model Code 2020*).

Klasifikasi komprehensif retak beton yang menjadi dasar utama dalam pemilihan teknologi repair retak beton. Retak diklasifikasikan berdasarkan penyebab terbentuknya, lebar retak, dan aktivitas retak, karena ketiga parameter ini secara langsung memengaruhi efektivitas metode repair yang diterapkan.

Berdasarkan penyebab, retak beton dapat berupa retak susut, retak termal, retak struktural, serta retak akibat reaksi kimia internal seperti alkali-silica reaction (ASR). Berdasarkan lebar retak, retak mikro ($<0,1$ mm) umumnya lebih berpengaruh terhadap durabilitas, sedangkan retak dengan lebar lebih besar ($>0,3$ mm) dapat memengaruhi kinerja struktural. Dari sisi aktivitas, retak dibedakan menjadi retak pasif (dormant cracks) dan retak aktif (moving cracks) yang mengalami pembukaan dan penutupan akibat beban atau perubahan temperatur.

Gambar ini menegaskan bahwa retak tidak selalu identik dengan kegagalan struktural, namun hampir selalu berperan sebagai jalur masuk zat agresif yang mempercepat degradasi beton dan korosi tulangan. Oleh karena itu, pemahaman klasifikasi retak menjadi langkah awal yang krusial dalam menentukan apakah repair ditujukan untuk *pemulihan kapasitas struktural, pengendalian durabilitas, atau perlindungan permukaan semata*.

Secara konseptual, Gambar 7.1 berfungsi sebagai kerangka dasar diagnosis retak beton, yang menghubungkan karakteristik retak dengan strategi repair yang tepat, sehingga meminimalkan risiko kegagalan repair ulang dan meningkatkan umur layanan struktur.

7.4 Routing and Sealing

Metode routing and sealing dilakukan dengan memperlebar bagian permukaan retak, kemudian mengisinya dengan **sealant elastis atau mortar repair**. Metode ini umumnya digunakan untuk:

Retak non-struktural, Retak permukaan akibat susut atau temperatur, dan Perbaikan cepat dengan biaya rendah. Keterbatasan utama metode ini adalah tidak memulihkan kapasitas struktural, sehingga hanya berfungsi sebagai pengendalian durabilitas.

7.5 Stitching dan Mechanical Crack Repair

Stitching dilakukan dengan memasang batang baja atau *U-staple* melintang retak untuk mentransfer gaya tarik. Metode ini sering dikombinasikan dengan injection untuk meningkatkan kinerja struktural.

Metode mekanis ini efektif untuk: Retak struktural statis, dan Retak akibat konsentrasi tegangan lokal. Namun, metode ini kurang sesuai untuk retak aktif karena tidak mampu mengakomodasi deformasi berulang.

7.6 Overlay dan Surface Treatment untuk Pengendalian Retak

Overlay tipis berbasis mortar semen, polimer, atau ECC dapat digunakan untuk mengendalikan retak permukaan dan meningkatkan durabilitas. Surface treatment seperti coating dan waterproofing berfungsi sebagai lapisan proteksi tambahan terhadap penetrasi zat agresif.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa overlay berbasis ECC mampu: Mengendalikan pembukaan retak, Menjaga lebar retak mikro, dan Meningkatkan ketahanan jangka panjang struktur beton.

Tabel 7.2. Perbandingan Teknologi Repair Retak Beton

Metode	Fungsi Struktural	Fleksibilitas	Aplikasi Utama
Epoxy injection	Tinggi	Rendah	Retak pasif struktural
PU injection	Rendah-sedang	Tinggi	Retak aktif
Routing & sealing	Rendah	Tinggi	Retak permukaan
ECC overlay	Sedang-tinggi	Sedang	Retak berulang

7.7 Teknologi Self-Healing Concrete untuk Repair Retak

Teknologi self-healing memanfaatkan mekanisme: Autogenous healing (hidrasi lanjutan dan presipitasi CaCO_3), dan Agen tambahan seperti bakteri, kapsul polimer, dan mineral reaktif.

Retak mikro ($<100\text{ }\mu\text{m}$) dapat tertutup secara mandiri, sehingga menurunkan permeabilitas dan memperpanjang umur layanan struktur [28–31]. Teknologi ini sangat menjanjikan untuk repair preventif dan pemeliharaan jangka panjang.



Gambar 7.2. Klasifikasi teknologi repair retak beton berdasarkan jenis retak, aktivitas retak, dan tujuan perbaikan struktural maupun durabilitas (diadaptasi dari ACI 224R, ACI 546R, EN 1504, dan fib Model Code 2020).

Kerangka klasifikasi teknologi repair retak beton yang mengaitkan karakteristik retak dengan metode repair yang paling sesuai. Retak diklasifikasikan berdasarkan penyebab dan aktivitasnya, yaitu retak pasif (dormant cracks) dan retak aktif (moving cracks), serta berdasarkan lebar dan perannya terhadap kinerja struktur.

Untuk retak pasif dengan lebar kecil hingga sedang, teknologi repair seperti epoxy injection atau microfine cement injection direkomendasikan karena mampu memulihkan kontinuitas struktural dan meningkatkan kekedapan beton. Sebaliknya, retak aktif yang mengalami pergerakan berulang memerlukan sistem repair yang fleksibel, seperti polyurethane (PU) injection, routing and sealing dengan sealant elastomerik, atau overlay berbasis material daktil.

Gambar ini juga menekankan bahwa tujuan repair – apakah untuk pemulihan struktural, pengendalian durabilitas, atau sekadar perlindungan permukaan – harus menjadi dasar utama dalam pemilihan teknologi repair. Kesalahan umum dalam praktik lapangan adalah penerapan material kaku pada retak aktif, yang hampir selalu berujung pada kegagalan repair ulang. Secara konseptual, Gambar 7.2 berfungsi sebagai peta keputusan teknis bagi engineer dalam memilih teknologi repair retak beton yang tepat, sehingga solusi yang diterapkan efektif, kompatibel, dan mampu memperpanjang umur layanan struktur.

7.8 Evaluasi Keberhasilan Repair Retak Beton

Keberhasilan repair retak beton tidak hanya dinilai dari tertutupnya retak, tetapi juga dari: Stabilitas retak terhadap waktu dan beban, Penurunan permeabilitas, dan Kinerja struktural jangka panjang. Pendekatan performance-based evaluation semakin direkomendasikan dalam standar internasional untuk memastikan keberlanjutan repair.

7.9 Model Lebar Retak, Laju Korosi & Efektivitas Repair Beton

Pendekatan Mekanistik dan Kuantitatif

7.9.1 Peran Lebar Retak dalam Degradasi Beton

Lebar retak (w) merupakan **parameter pengendali utama durabilitas beton**, karena secara langsung memengaruhi:

- laju penetrasi klorida,
- difusi CO₂ (karbonasi),
- dan laju korosi tulangan.

Studi eksperimental menunjukkan bahwa **peningkatan lebar retak dari 0,1 mm ke 0,3 mm dapat meningkatkan laju korosi hingga 3-10 kali lipat**, tergantung lingkungan.

7.9.2 Model Mekanik Lebar Retak Beton Bertulang

Model Dasar Lebar Retak (EN 1992-1-1)

Lebar retak dihitung dengan:

$$w = s_r \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (7-1)$$

di mana:

- s_r = jarak retak rata-rata
- ε_{sm} = regangan baja
- ε_{cm} = regangan beton

Pendekatan ini umum digunakan untuk **retak struktural**.

Model Sederhana Praktis

Untuk evaluasi cepat:

$$w \approx \frac{f_s \cdot s}{E_s} \quad (7-2)$$

Dengan:

- f_s = tegangan baja (Mpa)
- s = jarak antar tulangan (mm)
- E_s = 200,000 MPa

Contoh Hitung Lebar Retak

Data:

- Tegangan baja $f_s = 200$ MPa
- Spasi tulangan $s = 150$ mm

$$w = \frac{200 \times 150}{200,000} = 0,15 \text{ mm}$$

Interpretasi

- $w = 0,15$ mm
- Aman untuk interior, **berisiko untuk lingkungan laut**

7.9.3 Hubungan Lebar Retak dan Difusi Klorida

Difusivitas efektif pada beton retak:

$$D_{eff} = D_0 (1 + \alpha \cdot w) \quad (7-3)$$

Dengan:

- D_0 = difusivitas beton utuh
- α = 10-30 (eksperimental)
- w dalam mm

Contoh Pengaruh Retak

- $D_0 = 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- $w = 0,3 \text{ mm}$
- $\alpha = 20$

$$D_{eff} = 2 \times 10^{-12} (1 + 6) = 1,4 \times 10^{-11}$$

⇒ Difusi klorida ↑ 7 kali

7.9.4 Model Laju Korosi Tulangan

Model Faraday (Pendekatan Praktis)

Laju kehilangan diameter baja:

$$v_{corr} = \frac{0,0116 \cdot i_{corr}}{\rho} \quad (7-4)$$

Atau secara praktis:

$$\Delta d = k \cdot i_{corr} \cdot t \quad (7-5)$$

Dengan:

- i_{corr} = arus korosi ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
- t = waktu (tahun)

Klasifikasi Laju Korosi

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Kondisi
$< 0,1$	Pasif
$0,1-0,5$	Rendah
$0,5-1,0$	Sedang
$>1,0$	Tinggi

Contoh Hitung Korosi

Data:

- $i_{corr} = 1,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
- Waktu = 10 tahun

$$\Delta d \approx 0,12 \text{ mm}$$

⇒ Penurunan luas baja $\sim 7-10\%$

7.9.5 Hubungan Lebar Retak – Laju Korosi

Model empiris:

$$i_{corr} = i_0(1 + \beta w) \quad (7-6)$$

Dengan:

- $i_0 = 0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
- $\beta = 5-15$

Contoh:

- $w = 0,3 \text{ mm}$
- $\beta = 10$

$$i_{corr} = 0,2 (1 + 3) = 0,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

⇒ Korosi meningkat 4x

Efektivitas Teknologi Repair terhadap Retak & Korosi

Reduksi Lebar Retak

Teknologi Repair	Lebar Retak Efektif
Crack injection epoxy	0 (retak pasif)
PU injection	<0,1 mm
Overlay OPC	0,2-0,3 mm
ECC overlay	<0,05 mm
Self-healing ECC	~0

Reduksi Laju Korosi

Metode	Penurunan i_{corr}
Patch repair	20-40%
Patch + inhibitor	40-60%
ECC overlay	60-80%
Cathodic protection	>90%

BAB 8

TEKNOLOGI REPAIR BETON TERKOROSI

Korosi tulangan merupakan penyebab dominan degradasi dan kegagalan dini struktur beton bertulang di berbagai belahan dunia. Studi internasional menunjukkan bahwa lebih dari separuh biaya pemeliharaan infrastruktur beton dialokasikan untuk menangani kerusakan yang berkaitan dengan korosi tulangan akibat karbonasi dan penetrasi klorida (Angst, U., et al., 2020; Andrade, C., 2021; Poursae, A., 2022). Selain mengurangi penampang efektif baja, korosi menghasilkan produk ekspansif yang menimbulkan retak, delaminasi, dan spalling beton penutup, sehingga mempercepat degradasi struktural dan durabilitas.

Dalam konteks manajemen siklus hidup struktur, teknologi repair beton terkorosi tidak dapat dipandang sebagai perbaikan lokal semata, melainkan sebagai intervensi strategis yang harus mampu mengendalikan mekanisme elektrokimia korosi secara berkelanjutan. Oleh karena itu, bab ini membahas mekanisme korosi tulangan secara ringkas serta berbagai teknologi repair beton terkorosi, mulai dari metode konvensional hingga teknologi elektrokimia modern yang berbasis kinerja jangka panjang.

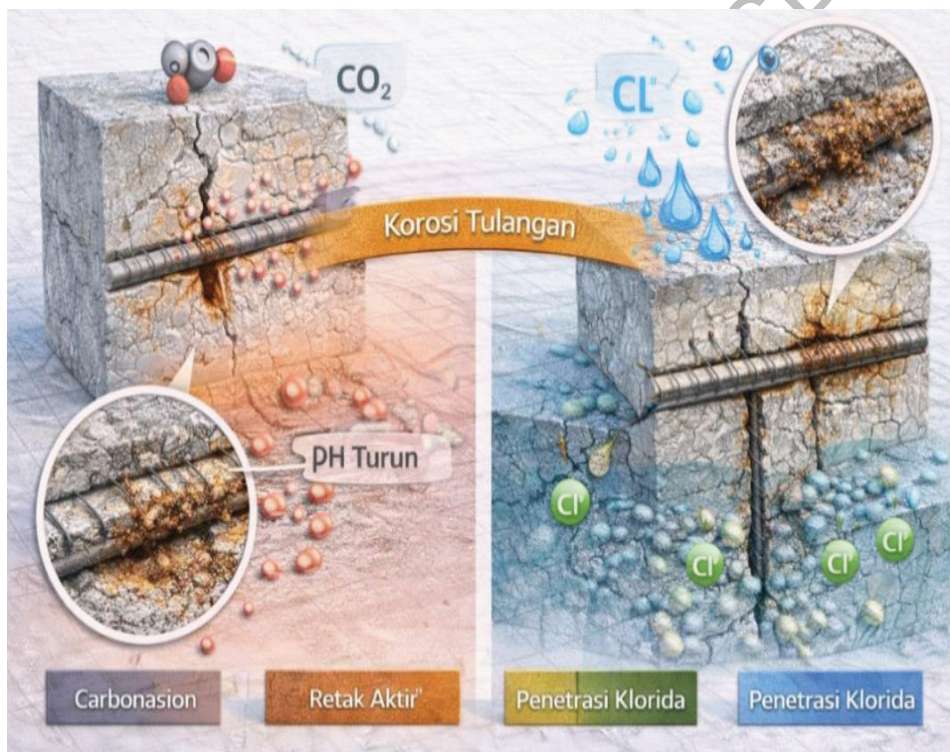
8.1 Mekanisme Korosi Tulangan dalam Beton

Tulangan baja dalam beton terlindungi oleh lingkungan alkalis beton ($\text{pH} \approx 12,5\text{--}13,5$) yang membentuk lapisan pasif pada permukaan baja. Kondisi pasif ini dapat terganggu oleh dua mekanisme utama, yaitu karbonasi dan penetrasi klorida (Tuutti, K., 2020; Papadakis, V.G., 2020; Tang, L., Nilsson, L.-O., 2021).

Karbonasi menurunkan pH beton akibat reaksi CO_2 dengan kalsium hidroksida, sedangkan klorida merusak lapisan pasif

secara lokal dan memicu pitting corrosion. Korosi yang terjadi menghasilkan oksida besi dengan volume 2–6 kali lebih besar dari baja asal, sehingga menimbulkan tekanan internal pada beton penutup.

Literatur mutakhir menegaskan bahwa korosi tulangan bersifat heterogen dan lokal, sehingga tingkat kerusakan dapat bervariasi secara spasial pada satu elemen struktur yang sama (Angst, U., et al., 2021; Otieno, M., et al., 2022). Hal ini menjadikan diagnosis dan desain repair beton terkorosi sebagai proses yang kompleks dan berbasis data lapangan.



Gambar 8.1. Tahapan inisiasi dan propagasi korosi tulangan pada beton bertulang akibat karbonasi dan penetrasi klorida (diadaptasi dari Tuutti, 2020; Angst et al. 2023; ACI 562, 2021; dan fib Model Code 2020).

Konsep dua tahap utama korosi tulangan pada beton bertulang, yaitu tahap inisiasi dan tahap propagasi, yang menjadi dasar dalam desain teknologi repair beton terkorosi. Pada tahap inisiasi, tulangan baja masih berada dalam kondisi pasif akibat lingkungan alkalis beton. Namun, seiring waktu, karbonasi atau penetrasi ion klorida menurunkan pH beton atau merusak lapisan pasif baja, sehingga korosi mulai terinisiasi.

Tahap inisiasi berlangsung tanpa indikasi kerusakan visual yang jelas, tetapi sangat menentukan umur layanan struktur. Ketika lapisan pasif rusak, struktur memasuki tahap propagasi, di mana reaksi elektrokimia korosi berlangsung aktif. Produk korosi yang terbentuk memiliki volume lebih besar dibandingkan baja asal, sehingga menghasilkan tekanan internal yang memicu retak memanjang, delaminasi, dan spalling beton penutup.

Gambar ini menegaskan bahwa sebagian besar kerusakan yang terlihat di lapangan sebenarnya merupakan konsekuensi dari proses korosi yang telah berlangsung lama. Oleh karena itu, strategi repair beton harus dirancang untuk mengintervensi mekanisme korosi sejak tahap propagasi, atau bahkan lebih ideal pada akhir tahap inisiasi, melalui pengendalian penetrasi klorida, perlindungan tulangan, dan desain repair berbasis durabilitas.

Secara konseptual, Gambar 8.1 menjadi landasan penting dalam memahami mengapa repair beton terkorosi harus berorientasi pada pengendalian mekanisme korosi, bukan hanya pemulihan beton yang telah terkelupas atau rusak secara visual.

8.2 Prinsip Dasar Repair Beton Terkorosi

Tujuan utama repair beton terkorosi meliputi: Menghentikan atau memperlambat laju korosi tulangan, Memulihkan integritas struktural dan penutup beton, dan Meningkatkan durabilitas jangka panjang struktur.

Prinsip dasar repair menegaskan bahwa pengangkatan beton rusak saja tidak cukup. Sistem repair harus dirancang untuk mengendalikan kondisi elektrokimia di sekitar tulangan. Salah satu kegagalan paling umum adalah terbentuknya incipient anodes, yaitu zona anodik baru di sekitar area patch repair yang mempercepat korosi lanjutan (Raupach, M., 2020; Beushausen, H., Alexander, M., 2023).

Tabel 8.1. Tujuan Repair Beton Terkorosi dan Strategi Teknis

Tujuan	Mekanisme yang Dikendalikan	Strategi Repair
Menghentikan korosi	Reaksi elektrokimia	CP, inhibitor
Memulihkan beton	Kehilangan penutup	Patch repair
Meningkatkan durabilitas	Penetrasi agresif	Coating, overlay

Tabel ini menunjukkan bahwa repair beton terkorosi harus mengombinasikan pemulihan fisik beton dan pengendalian mekanisme korosi secara aktif.

8.3 Patch Repair Konvensional

Patch repair merupakan metode paling umum digunakan dalam praktik lapangan. Metode ini melibatkan: Pengangkatan beton terdegradasi, Pembersihan atau penggantian tulangan, dan Pengisian kembali dengan mortar atau beton repair.

Meskipun sederhana, patch repair konvensional sering gagal secara dini jika diterapkan tanpa perlindungan tambahan terhadap

tulangan. Studi Q1 menunjukkan bahwa patch repair saja umumnya hanya memberikan perpanjangan umur layanan jangka pendek, terutama pada lingkungan agresif (Raupach, M., Schießl, P., 2021; Angst, U., et al., 2023).

8.4 Penggunaan Corrosion Inhibitor

Corrosion inhibitor digunakan untuk memperlambat reaksi korosi dengan menghambat proses elektrokimia pada permukaan baja. Inhibitor dapat diaplikasikan sebagai: Lapisan pada tulangan, Campuran dalam mortar repair, dan Aplikasi permukaan (migrating inhibitors). Inhibitor berbasis nitrit dan amino-alcohol terbukti efektif menurunkan laju korosi, khususnya bila dikombinasikan dengan material repair berpermeabilitas rendah.

8.5 Cathodic Protection (CP)

Cathodic protection (CP) merupakan teknologi paling efektif untuk menghentikan korosi tulangan secara aktif. Prinsip CP adalah menjadikan tulangan sebagai katoda sehingga reaksi oksidasi dapat dicegah (Bertolini, L., et al., 2020; Christodoulou, C., et al., 2021; Glass, G.K., et al., 2020).

Terdapat dua sistem utama: Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) dan Galvanic Cathodic Protection. Studi jangka panjang menunjukkan bahwa sistem CP yang dirancang dan dipelihara dengan baik mampu memperpanjang umur layanan struktur beton hingga 30-50 tahun (Pedeferri, P., et al., 2021; Redaelli, E., et al., 2022).



Gambar 8.2. Mekanisme korosi tulangan dalam beton bertulang serta implikasinya terhadap strategi repair beton terkorosi (diadaptasi dari Angst et al. 2023, Andrade & Alonso, 2021, ACI 562, dan fib Model Code 2020).

Mekanisme korosi tulangan dalam beton bertulang yang menjadi penyebab utama degradasi dan kegagalan dini struktur beton. Pada kondisi awal, tulangan baja terlindungi oleh lingkungan alkalis beton yang membentuk lapisan pasif pada permukaan baja. Namun, perlindungan ini dapat rusak akibat karbonasi atau penetrasi ion klorida, yang menurunkan pH beton atau merusak lapisan pasif tulangan.

Ketika lapisan pasif terdegradasi, terbentuk sel elektrokimia antara daerah anoda dan katoda pada tulangan. Reaksi korosi menghasilkan produk korosi dengan volume lebih besar dibandingkan baja asal, sehingga menimbulkan tegangan ekspansif pada beton penutup. Tegangan ini memicu retak memanjang, delaminasi, dan spalling, yang selanjutnya mempercepat masuknya air dan klorida ke dalam beton.

Gambar ini juga menunjukkan bahwa korosi tulangan bersifat progresif dan tidak seragam, sering kali berupa pitting corrosion, sehingga kerusakan dapat berkembang secara lokal namun

berdampak signifikan terhadap kapasitas struktural. Oleh karena itu, strategi repair beton terkorosi tidak cukup hanya dengan patch repair lokal, tetapi harus dirancang untuk mengendalikan mekanisme korosi lanjutan, misalnya melalui penggunaan corrosion inhibitor, cathodic protection, atau sistem repair dengan permeabilitas sangat rendah.

Secara konseptual, Gambar 8.2 menegaskan bahwa pemahaman mekanisme korosi tulangan merupakan dasar utama dalam pemilihan teknologi repair beton terkorosi, agar solusi yang diterapkan efektif dan mampu memperpanjang umur layanan struktur secara signifikan.

8.6 Electrochemical Repair Techniques

Selain CP, berbagai teknik electrochemical repair telah dikembangkan, antara lain: Chloride extraction, Re-alkalisation, dan Electrochemical realkalisation. Teknologi ini efektif menurunkan kandungan klorida dan memulihkan alkalinitas beton tanpa pembongkaran besar. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada desain sistem, durasi aplikasi, dan kondisi struktur (Angst, U., 2020).

Tabel 8.2. Perbandingan Teknologi Repair Beton Terkorosi

Metode	Efektivitas Korosi	Kompleksitas	Umur Layanan
Patch repair	Rendah-sedang	Rendah	Pendek
Inhibitor	Sedang	Rendah	Sedang
CP	Sangat tinggi	Tinggi	Panjang
Electrochemical	Tinggi	Tinggi	Panjang

8.7 Kombinasi Strategi Repair Beton Terkorosi

Pendekatan modern menekankan kombinasi strategi repair, misalnya: Patch repair + corrosion inhibitor, dan Patch repair + cathodic protection.

Kombinasi ini terbukti lebih efektif dalam mengendalikan korosi jangka panjang dan meminimalkan risiko incipient anodes dibandingkan metode tunggal (Van Belleghem, B., et al., 2022; Stewart, M.G., 2022; Bastidas-Arteaga, E., 2023).

8.8 Evaluasi Kinerja dan Monitoring Pasca-Repair

Keberhasilan repair beton terkorosi harus dievaluasi melalui monitoring jangka panjang, meliputi: Potensial korosi, Resistivitas beton, dan Laju korosi tulangan. Monitoring memungkinkan deteksi dini kegagalan sistem repair dan penyesuaian strategi pemeliharaan berbasis kinerja (ASTM C876, 2022; ISO 12696, 2020; fib Model Code 2020).

8.9 Model Kuantitatif Repair Beton Terkorosi Patch Repair vs Cathodic protection (CP)

8.9.1 Kerangka Kuantitatif Repair Beton Terkorosi

Repair beton terkorosi bertujuan:

- 1. Mengendalikan laju korosi tulangan**
- 2. Memulihkan kapasitas struktur**
- 3. Memperpanjang Remaining Service Life (RSL)**

Secara kuantitatif, efektivitas repair diukur dari:

- Penurunan **laju korosi** i_{corr}
- Peningkatan **umur inisiasi/propagasi**
- Peningkatan **Reliability Index** (β)

8.9.2 Model laju Korosi Tulangan (Baseline)

Laju korosi direpresentasikan oleh arus korosi:

$$i_{corr} \text{ } \mu\text{A}/\text{cm}^2 \quad (8-1)$$

Hubungan dengan kehilangan diameter baja (pendekatan Faraday):

$$\Delta d = k \cdot i_{corr} \cdot t \quad (8-2)$$

Dengan

- $k \approx 0,0116 \text{ mm}/(\mu\text{A.th})$

Klasifikasi Kondisi Korosi

$i_{corr}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	Kondisi
<0,1	Pasif
0,1-0,5	Rendah
0,5-1,0	Sedang
>1,0	Tinggi

8.9.3 Patch Repair: Model Kuantitatif

Mekanisme Patch Repair

Patch repair bekerja dengan:

- menghilangkan beton rusak
- membersihkan tulangan
- mengganti dengan mortar repair

Namun **tidak mengubah kondisi elektrokimia global**, sehingga sering memicu **incipient anoda effect**.

Model Laju Korosi Pasca Patch Repair

Pendekatan empiris:

$$i_{corr,patch} = \alpha \cdot i_{corr,0} \quad (8-3)$$

Dengan:

- $\alpha = 0,6-0,8$

Contoh Hitung – Patch Repair

Data awal:

- $i_{corr,0} = 1,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

Setelah patch repai:

$$i_{corr,patch} = 0,7 \times 1,2 = 0,84 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

Dampak terhadap Umur Layanan

Jika laju korosi tetap:

- Kehilangan baja signifikan dalam **10-15 tahun**
- RSL terbatas

Kesimpulan kuantitatif

Patch Repair = **solusi jangka pendek**

8.9.4 Cathodic Protection (CP): Model Kuantitatif

Prinsip Dasar CP

CP menurunkan potensial baja hingga:

$$E_{steel} < -850 \text{ mV (CSE)}$$

Akibatnya:

$$i_{corr} \rightarrow 0$$

Model Laju Korosi dengan CP

Pendekatan praktis:

$$i_{corr, CP} \leq 0,05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

⇒ Korosi **praktis dihentikan**

Contoh Hitung – CP

Data awal:

- $i_{corr,0} = 1,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

Setelah CP:

$$i_{corr, CP} \leq 0,05 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

Penurunan:

$$\frac{1,2}{0,05} = 24x$$

⇒ Umur layanan naik ~ 20-30 kali

8.9.5 Perbandingan RSL: Patch vs CP

Metode	i_{corr}	RSL
Tanpa repair	1,2	< 10 th
Patch repair	0,8	10-15 th
Patch + inhibitor	0,4	15-22 th
CP (ICCP/GCP)	≤0,05	> 50 th

8.9.6 Pengaruh terhadap Reliability Index (β)

Model sederhana

$$\beta(t) = \beta_0 - \gamma \cdot \Delta A_s(t) \quad (8-4)$$

Dengan CP:

- $\Delta A_s \approx 0$
- β stabil atau meningkat

Contoh numerik

Kondisi	β
Awal	2,2
Patch repair	2,4
CP	3,8-4,2

8.9.7 Model Biaya Siklus Hidup (Ringkas)

$$LCC = C_0 + \sum \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (8-5)$$

Metode	Biaya awal	Biaya 30 th
Patch repair	Rendah	Tinggi (repair ulang)
CP	Tinggi	Lebih rendah

Paradoks biaya

CP mahal di awal, **murah jangka Panjang**

8.9.8 Aturan Keputusan Kuantitatif (Patch vs CP)

Kondisi	Rekomendasi
$i_{corr} < 0,3$ & RSL $> 20^{\text{th}}$	Patch
$0,3 < i_{corr} < 0,7$	patch + inhibitor
$i_{corr} > 0,7$	CP wajib
Infrastruktur kritis	CP

BAB 9

TEKNOLOGI REPAIR BETON AKIBAT DEGRADASI KIMIA & LINGKUNGAN AGRESIF

Degradasi kimia merupakan salah satu penyebab utama penurunan kinerja dan umur layanan struktur beton, khususnya pada lingkungan industri, pesisir, instalasi pengolahan limbah, pertanian intensif, dan area dengan aktivitas biologis tinggi. Tidak seperti kerusakan mekanik murni, degradasi kimia bersifat progresif, kumulatif, dan sering tersembunyi pada tahap awal, sehingga kerusakan baru terdeteksi setelah beton mengalami pelunakan, ekspansi, atau kehilangan massa yang signifikan (Scrivener, K.L., et al., 2021; De Belie, N., et al., 2022; Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 2014).

Selain itu, degradasi kimia hampir selalu berinteraksi dengan mekanisme kerusakan lain, seperti korosi tulangan, retak beton, dan biodeterioration. Oleh karena itu, teknologi repair beton pada lingkungan agresif harus dirancang dengan pendekatan berbasis mekanisme, multimekanisme, dan durabilitas jangka panjang, bukan sekadar perbaikan lokal.

9.1 Jenis dan Mekanisme Degradasi Kimia Beton

Degradasi kimia beton terjadi akibat interaksi antara **fase padat pasta semen** dengan zat agresif dari lingkungan. Mekanisme utama meliputi: Serangan sulfat, Serangan asam, Leaching (pelindian kalsium), Alkali-Silica Reaction (ASR), dan Biodeterioration berbasis mikroba.

Reaksi kimia tersebut menyebabkan perubahan mikrostruktur, seperti peningkatan porositas, pembentukan produk ekspansif, dan pelunakan pasta semen. Literatur terbaru menegaskan bahwa degradasi kimia sering mempercepat penetrasi zat agresif lain, sehingga memperburuk kerusakan secara simultan.

Tabel 9.1. Jenis Degradasi Kimia Beton dan Dampaknya

Jenis Degradasi	Agen Agresif	Dampak Utama	Risiko Jangka Panjang
Sulfat	SO_4^{2-}	Ekspansi, retak	Kehilangan kekuatan
Asam	pH rendah	Pelunakan, erosi	Kehilangan massa
Leaching	Air lunak	Pori membesar	Penurunan durabilitas
ASR	Alkali + agregat	Retak peta	Deformasi
Biodeterioration	Mikroba	Asam biogenik	Kerusakan cepat

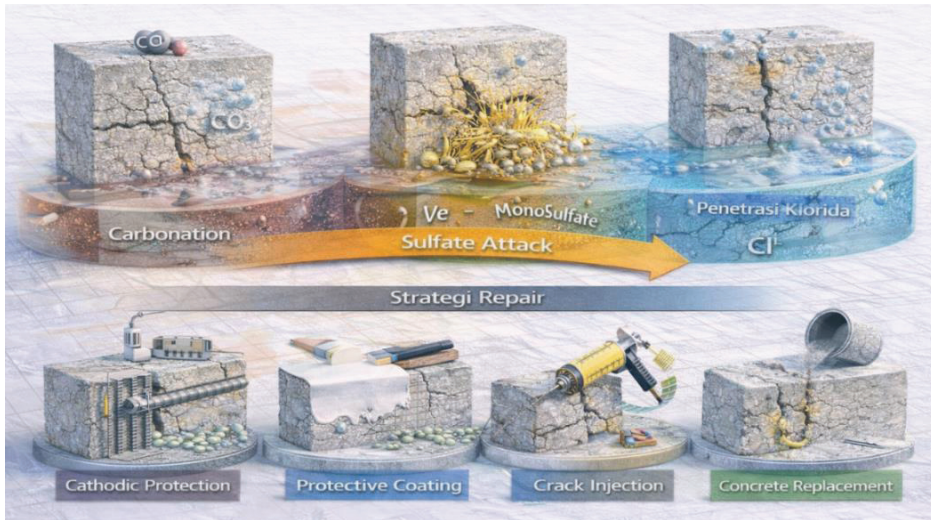
Tabel ini menunjukkan bahwa setiap jenis degradasi kimia memiliki mekanisme dan dampak yang berbeda, sehingga tidak dapat ditangani dengan satu strategi repair yang seragam.

9.2 Serangan Sulfat dan Teknologi Repair

Serangan sulfat terjadi ketika ion sulfat bereaksi dengan produk hidrasi semen, membentuk ettringite dan gypsum yang bersifat ekspansif. Kerusakan ditandai oleh retak ekspansif, pengelupasan permukaan, dan penurunan kuat tekan.

Teknologi repair beton akibat serangan sulfat menekankan: Pengangkatan beton terdegradasi secara menyeluruh, Penggunaan sulfate-resistant repair mortar atau geopolymer-based repair, Proteksi permukaan menggunakan coating tahan kimia.

Studi mutakhir menunjukkan bahwa geopolymer berbasis slag dan fly ash memiliki ketahanan sulfat yang jauh lebih baik dibanding mortar semen Portland konvensional (Bernal, S.A., et al., 2021).



Gambar 9.1. Klasifikasi mekanisme degradasi kimia beton dan keterkaitannya dengan strategi teknologi repair beton pada lingkungan agresif (*diadaptasi dari Neville, 2014, De Belie et al. 2022; Thomas et al. 2020; dan fib Model Code 2020*).

Klasifikasi utama degradasi kimia beton yang umum terjadi pada struktur beton di lingkungan agresif, serta hubungannya dengan pendekatan teknologi repair beton yang sesuai. Mekanisme degradasi yang ditampilkan meliputi serangan sulfat, serangan asam, alkali-silica reaction (ASR), leaching, dan biodeterioration.

Setiap mekanisme degradasi bekerja melalui reaksi kimia yang berbeda pada matriks beton. Serangan sulfat memicu pembentukan ettringite dan gypsum yang bersifat ekspansif, sedangkan serangan asam menyebabkan pelarutan langsung fase hidrasi semen. ASR menghasilkan gel ekspansif internal yang memicu retak peta dan deformasi, sementara leaching melarutkan kalsium dan meningkatkan porositas beton. Biodeterioration, khususnya pada sistem limbah, mempercepat degradasi melalui produksi asam oleh mikroorganisme.

Gambar ini menegaskan bahwa degradasi kimia beton tidak bersifat tunggal, melainkan sering terjadi secara simultan dan

saling memperkuat mekanisme kerusakan lainnya seperti korosi tulangan dan retak beton. Oleh karena itu, teknologi repair beton pada lingkungan agresif harus dirancang berdasarkan mekanisme dominan, dengan pemilihan material repair tahan kimia, pengendalian permeabilitas, serta perlindungan permukaan yang memadai.

Secara konseptual, Gambar 9.1 berfungsi sebagai peta keputusan awal (*conceptual framework*) dalam desain repair beton akibat degradasi kimia, yang menghubungkan jenis agen agresif dengan strategi repair berbasis durabilitas dan umur layanan.

9.3 Serangan Asam dan Lingkungan Industri

Serangan asam merupakan bentuk degradasi kimia paling agresif, umum terjadi pada instalasi pengolahan limbah, industri kimia, peternakan, dan fasilitas pertanian. Asam melarutkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan C-S-H, menyebabkan pelunakan dan kehilangan massa beton secara progresif (De Belie, N., et al., 2022; Shi, C., et al., 2021; Zhang, P., et al., 2025).

Teknologi repair yang direkomendasikan meliputi: Acid-resistant repair materials berbasis polimer atau geopolimer, Sistem lining dan coating dengan ketahanan kimia tinggi, dan Desain beton repair dengan permeabilitas sangat rendah.

9.4 Alkali-Silica Reaction (ASR) dan Strategi Repair

ASR merupakan reaksi antara alkali semen dan agregat reaktif yang menghasilkan gel higroskopis ekspansif. Kerusakan ditandai oleh retak peta (*map cracking*), deformasi, dan penurunan kekakuan struktur (Thomas, M., et al. 2020; Fournier, B., et al., 2023).

Repair beton akibat ASR bersifat kompleks karena reaksi dapat terus berlangsung setelah repair. Strategi yang umum diterapkan

meliputi: Pengendalian kelembapan struktur, Penggunaan material repair rendah alkali, dan Aplikasi lithium-based treatment untuk menekan reaktivitas ASR.

Tabel 9.2. Strategi Repair Beton Akibat ASR

Pendekatan	Tujuan	Efektivitas
Kontrol kelembapan	Menghambat reaksi	Sedang
Material rendah alkali	Mengurangi alkali	Sedang-tinggi
Lithium treatment	Menekan ekspansi	Tinggi

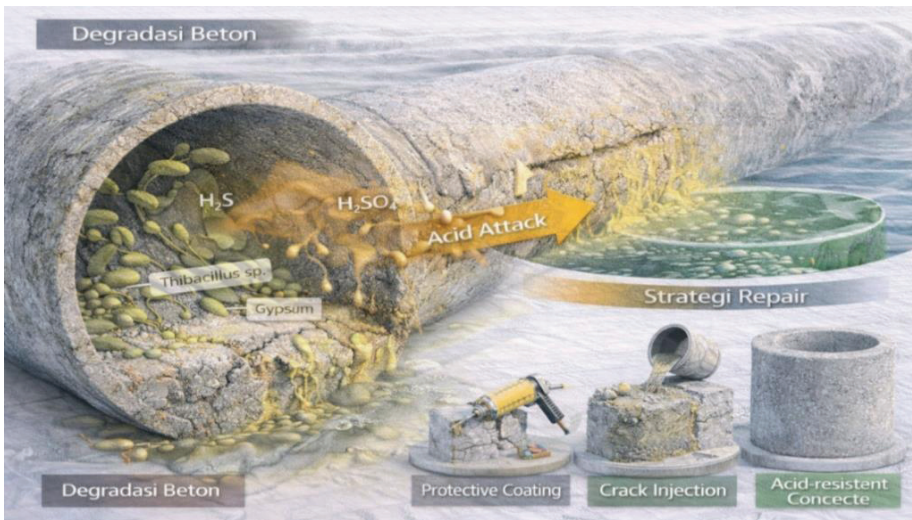
9.5 Leaching dan Soft Water Attack

Leaching terjadi akibat pelarutan kalsium dari pasta semen oleh air lunak atau air mengalir, yang menyebabkan peningkatan porositas dan penurunan kekuatan beton (Hooton, R.D., et al., 2022). Teknologi repair untuk kasus leaching menekankan: Material repair dengan densitas tinggi dan porositas rendah, Perlindungan permukaan melalui coating atau impregnasi silikat, dan Pengendalian aliran air pada struktur.

9.6 Biodeterioration dan Lingkungan Mikroba

Biodeterioration disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme yang menghasilkan asam, seperti asam sulfat biogenik pada sistem sewer. Kerusakan ini bersifat sangat agresif dan cepat, sering kali mengakibatkan kegagalan dini struktur beton (De Muynck, W., et al., 2020).

Teknologi repair modern mencakup: Material repair berbasis geopolymer dan polimer tahan biokimia, Coating antimikroba, dan Desain ulang ventilasi dan drainase untuk mengendalikan lingkungan mikroba.



Gambar 9.2. Mekanisme degradasi beton akibat serangan asam dan teknologi repair yang direkomendasikan pada lingkungan industri dan limbah (diadaptasi dari De Belie et al, Neville, EN 1504, dan fib Model Code 2020).

9.7 Prinsip Desain Repair Beton pada Lingkungan Agresif

Gambar 9.2 menggambarkan mekanisme degradasi beton akibat serangan asam serta hubungannya dengan strategi repair beton yang direkomendasikan. Serangan asam terjadi ketika beton terpapar larutan asam anorganik atau organik, yang menyebabkan pelarutan bertahap kalsium hidroksida dan fase C-S-H pada pasta semen.

Pada tahap awal, asam bereaksi dengan komponen alkalis beton, menurunkan pH dan menyebabkan pelunakan permukaan beton. Seiring waktu, proses ini berkembang menjadi kehilangan massa, peningkatan porositas, dan penurunan kuat mekanik, yang dapat berujung pada kerusakan struktural bila tidak ditangani. Pada lingkungan industri dan instalasi pengolahan limbah, degradasi ini sering dipercepat oleh kombinasi aliran fluida dan aktivitas biologis.

Gambar ini juga menunjukkan bahwa teknologi repair beton akibat serangan asam harus difokuskan pada pengendalian reaksi kimia lanjutan, bukan hanya penggantian beton rusak. Oleh karena itu, strategi repair yang direkomendasikan meliputi penggunaan material repair tahan asam berbasis polimer atau geopolymer, penerapan lining atau coating protektif, serta desain repair dengan permeabilitas sangat rendah untuk menghambat difusi asam.

Secara keseluruhan, gambar ini menegaskan bahwa keberhasilan repair beton pada lingkungan asam sangat bergantung pada pemahaman mekanisme degradasi kimia dan pemilihan sistem repair yang kompatibel secara kimia dan berorientasi durabilitas jangka panjang.

Desain repair beton pada lingkungan agresif harus berorientasi pada durabilitas jangka panjang. Prinsip utama meliputi: Identifikasi agen agresif dominan, Pemilihan material repair tahan kimia, Pengendalian permeabilitas dan retak, dan Evaluasi umur layanan pasca-repair. Pendekatan performance-based dan service-life-based repair design sangat dianjurkan untuk kondisi ekstrem.

Tabel 9.3. Prinsip Desain Repair Beton pada Lingkungan Agresif

Aspek Desain	Fokus Utama
Material	Ketahanan kimia
Mikrostruktur	Permeabilitas rendah
Detailing	Kontrol retak
Evaluasi	Umur layanan

9.8 Evaluasi Kinerja dan Monitoring Pasca-Repair

Keberhasilan repair beton akibat degradasi kimia harus dievaluasi melalui monitoring jangka panjang, termasuk: Perubahan sifat mekanik, Permeabilitas dan absorpsi, dan Kondisi permukaan dan lining. Monitoring memungkinkan deteksi dini kegagalan sistem

repair dan penyesuaian strategi pemeliharaan berbasis kinerja (Stewart, M.G., 2022; Bastidas-Arteaga, E., 2023).

9.9 Model Kuantitatif Repair Beton Akibat Degradasi Kimia & Lingkungan Agresif

9.1 Kerangka Kuantitatif Degradasi Kimia Beton

Berbeda dengan klorida dan karbonasi, degradasi kimia:

- bersifat reaksi kimia langsung,
- menyebabkan kehilangan massa, ekspansi, atau pelunakan,
- dan sering tidak dapat dipulihkan hanya dengan patch repair.

Secara kuantitatif, degradasi kimia dievaluasi melalui:

- laju reaksi (k),
- kehilangan kekuatan (Δf),
- laju penetrasi/ depth of attack (x),
- waktu menuju kondisi batas (t_{crit}).

9.2 Model Serangan Sulfat (Sulfate Attack)

9.2.1 Model Ekspansi Akibat Sulfat

Ekspansi beton akibat pembentukan ettringite sekunder dapat dimodelkan

$$\varepsilon_{sulf} = k_s \cdot C_{SO_4} \cdot t \quad (9-1)$$

Dimana:

- ε_{sulf} = strain ekspansi

- k_s = Koefisien reaksi sulfat
- C_{SO_4} = Konsentrasi sulfat (mol/L)
- t = Waktu (tahun)

9.2.2 Contoh Hitungan - Serangan Sulfat

Data :

- $k_s = 1,2 \times 10^{-4}$
- $C_{SO_4} = 0,02 \text{ mol/L}$
- $t = 10 \text{ tahun}$

$$\varepsilon_{sulf} = 1,2 \times 10^{-4} \times 0,02 \times 10 = 2,4 \times 10^{-5}$$

⇒ Strain $24 \mu\epsilon$

⇒ Cukup memicu retakan jika terkekang

9.2.3 Impikasi Repair

Kondisi	Strategi
$\varepsilon_{sulf} < 50 \mu\epsilon$	Surface protection
50-200 $\mu\epsilon$	Sulfate-resistant repair
$>200 \mu\epsilon$	Geopolymer / recasting

9.3 Model Serangan Asam (Acid Attack)

9.3.1 Model kehilangan ketebalan

Serangan asam dimodelkan sebagai laju pelarutan:

$$x(t) = k_a \cdot t \quad (9-2)$$

Dimana:

- x = Ketebalan beton tererosi (mm)
- k_a = laju serangan asam(mm/tahun)

9.3.2 Nilai Tipikal Laju Serangan Asam

Lingkungan	k_a (mm/th)
Air limbah ringan	0,5-1,0
Industri kimia	1-3
Sewer biogenik	3-6

Implikasi Repair

- OPC (tidak aman)
- Geopolymer / lining polimer 

9.4 Model Alkali-Silica Reaction (ASR)

9.4.1 Model Ekspansi ASR

$$\varepsilon_{ASR} t = \varepsilon_{max} (1 - e^{-k_{ASR} t}) \quad (9-3)$$

Contoh hitung

Jika:

- $\varepsilon_{max} = 0,004$
- $k_{ASR} = 0,15$

Pada $t = 10$ tahun:

$$\varepsilon_{ASR} = 0,004 (1 - e^{-1,5}) \approx 0,0031$$

⇒ Ekspansi 0,31% → kerusakan serius

Strategi Repair ASR

Level ϵ ASR	Strategi
< 0,1%	Moisture control
0,1-0,3%	Low-alkali overlay
> 0,3%	Recasting/ replacement

9.5 Model Leaching (Soft Water Attack)

9.5.1 Model Kehilangan Kalsium

$$\Delta C_a(t) = k_t \sqrt{t} \quad (9-4)$$

⇒ Porositas 1 → difusi klorida ↑

Contoh

Jika:

- $k_t = 0,8 \text{ mm}/\sqrt{\text{th}}$
- $t = 16 \text{ th}$

$$x = 0,8\sqrt{16} = 3,2 \text{ mm}$$

⇒ beton melemah di zona permukaan

9.6 Model Biodeterioration (Biogenic Sulfuric Acid)

9.6.1 Model Laju Serangan Biogenik

$$k_{bio} = f(pH, T, O_2) \quad (9-5)$$

Praktis:

$$x(t) = 4 - 10 \text{ mm/tahun (sewer)}$$

Implikasi

Waktu	Kehilangan
5 th	20-50 mm
10 th	Kegagalan struktural

⇒ Repair wajib material non-kalsium

9.7 Perbandingan Efektivitas Material Repair (Kuantitatif)

Material	Sulfat	Asam	ASR	Bio
OPC	Tidak Tahan	Tidak Tahan	Tidak Tahan	Tidak Tahan
Polymer-modified	Cukup Tahan	Cukup Tahan	Tidak Tahan	Cukup Tahan
Geopolymer	Sangat Tahan	Sangat Tahan	Cukup Tahan	Sangat Tahan
ECC	Cukup Tahan	Cukup Tahan	Cukup Tahan	Cukup Tahan
Lining Polimer	Tidak Relevan	Sangat Tahan	Tidak Relevan	Sangat Tahan

BAB 10

TEKNOLOGI REPAIR BETON PADA LINGKUNGAN LAUT & INFRASTRUKTUR KHUSUS

Lingkungan laut dan infrastruktur khusus—seperti pelabuhan, dermaga, jembatan laut, struktur offshore, breakwater, serta fasilitas energi pesisir—merupakan lingkungan paling agresif bagi struktur beton. Kombinasi konsentrasi klorida tinggi, siklus basah-kering, aksi gelombang dan arus, abrasi pasir, serta aktivitas biologis laut menyebabkan degradasi beton berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan lingkungan darat biasa (Mehta, P.K., Monteiro, 2014; Scrivener, K.L., et al., 2021; Alexander, M., et al., 2023). Berbagai studi jangka panjang menunjukkan bahwa tanpa strategi repair dan proteksi yang tepat, umur layanan struktur beton laut sering kali hanya mencapai 30–60% dari umur rencana (Andrade, C., 2021).

Berbeda dengan lingkungan darat, repair beton di lingkungan laut harus dirancang sebagai sistem proteksi menyeluruh (system-based repair) yang mampu mengendalikan mekanisme agresif secara simultan. Bab ini membahas karakteristik lingkungan laut, mekanisme kerusakan dominan, serta teknologi repair beton yang telah terbukti efektif untuk infrastruktur pesisir dan laut.

10.1 Karakteristik Lingkungan Laut terhadap Beton

Lingkungan laut ditandai oleh paparan klorida kontinu, fluktuasi kelembapan ekstrem, dan aksi mekanik berulang. Secara umum, lingkungan laut dibagi menjadi empat zona utama (fib Bulletin 34, 2020; EN 206, *Concrete* 2020): Submerged zone (terendam permanen), Tidal zone (zona pasang surut), Splash zone (zona percikan gelombang), dan Atmospheric marine zone (zona udara laut). Zona splash dan tidal dianggap paling kritis karena kombinasi klorida tinggi dan siklus basah-kering intens yang

mempercepat penetrasi klorida dan korosi tulangan (Angst, U., et al., 2020)

Tabel 10.1. Zona Lingkungan Laut dan Tingkat Agresivitas terhadap Beton

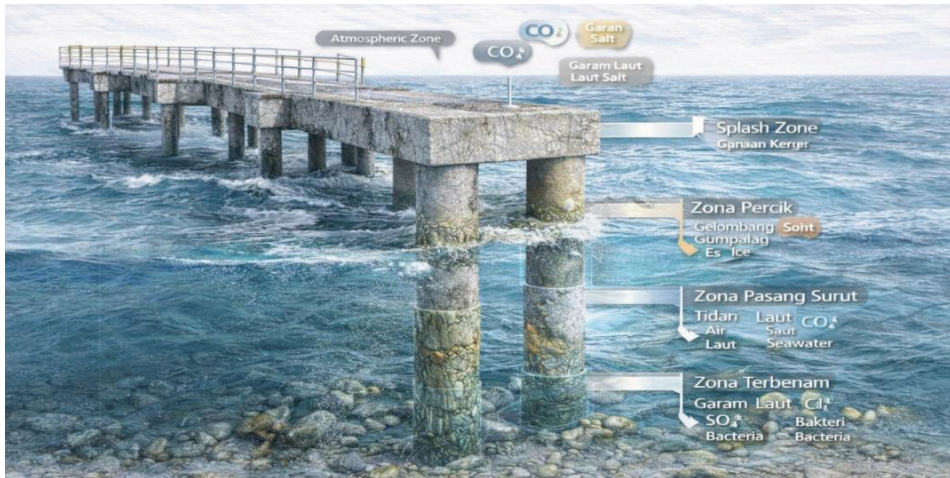
Zona Laut	Kondisi Lingkungan	Mekanisme Dominan	Tingkat Agresivitas
Submerged	Terendam terus	Difusi klorida	Sedang
Tidal	Basah–kering	Korosi + abrasi	Sangat tinggi
Splash	Percikan gelombang	Klorida + oksigen	Sangat tinggi
Atmospheric	Uap laut	Karbonasi + klorida	Sedang

Tabel ini menunjukkan bahwa zona splash dan tidal memerlukan perhatian khusus dalam desain repair karena merupakan lokasi kerusakan tercepat.

10.2 Mekanisme Kerusakan Beton di Lingkungan Laut

Mekanisme kerusakan utama beton di lingkungan laut meliputi: Korosi tulangan akibat klorida, Abrasi dan erosi oleh gelombang dan partikel pasir, Serangan kimia oleh sulfat dan magnesium, dan Biodeterioration laut, termasuk biofouling dan mikroorganisme.

Korosi tulangan merupakan mekanisme dominan yang memicu retak, spalling, dan kehilangan kapasitas struktural (Tang, L., Nilsson, L.-O., 2021; Beushausen, H., Alexander, M., 2023; Otieno, M., et al., 2022). Abrasi mekanik pada zona pasang surut mempercepat hilangnya selimut beton, sehingga tulangan menjadi lebih cepat terekspos (Horszczaruk, E., et al., 2021).



Gambar 10.1. Skema klasifikasi zona paparan lingkungan laut terhadap struktur beton dan tingkat agresivitasnya terhadap degradasi beton bertulang (*diadaptasi dari EN 206, fib Model Code 2020, Mehta & Monteiro, dan Neville*).

Klasifikasi zona paparan lingkungan laut yang digunakan sebagai dasar dalam desain durabilitas dan teknologi repair beton pada struktur pesisir dan laut. Zona paparan tersebut dibagi menjadi submerged zone, tidal zone, splash zone, dan atmospheric marine zone, masing-masing memiliki karakteristik agresivitas yang berbeda terhadap beton dan tulangan baja.

Submerged zone merupakan bagian struktur yang selalu terendam air laut. Pada zona ini, penetrasi klorida terjadi secara kontinu, namun laju korosi relatif lebih rendah dibanding zona lain karena keterbatasan suplai oksigen. **Tidal zone** mengalami siklus basah-kering yang berulang akibat pasang surut air laut, sehingga mempercepat difusi klorida dan korosi tulangan.

Splash zone merupakan zona paling agresif, karena menerima semprotan air laut, pengeringan cepat, dan suplai oksigen tinggi. Kondisi ini menghasilkan laju korosi tulangan dan degradasi beton tertinggi. Atmospheric marine zone berada di atas area percikan, di mana beton terpapar klorida dari aerosol udara laut dan karbonasi.

Secara keseluruhan, gambar ini menegaskan bahwa identifikasi zona paparan laut merupakan langkah awal yang krusial dalam perencanaan teknologi repair beton, karena setiap zona memerlukan strategi repair, material, dan tingkat proteksi yang berbeda untuk mencapai umur layanan yang ditargetkan.

10.3 Prinsip Dasar Repair Beton di Lingkungan Laut

Prinsip desain repair beton di lingkungan laut menekankan: Pengendalian penetrasi klorida, Penghentian atau perlambatan korosi tulangan, Peningkatan ketahanan permukaan terhadap abrasi, dan Perpanjangan umur layanan struktur secara signifikan.

Repair beton di lingkungan laut tidak boleh bersifat parsial atau sementara. Kegagalan repair sering terjadi ketika sistem repair hanya menutup kerusakan lokal tanpa mengendalikan sumber agresivitas lingkungan (Raupach, M., 2020; ACI 357R, 2021).

10.4 Patch Repair dan Recasting pada Struktur Laut

Patch repair dan recasting masih banyak digunakan sebagai metode dasar repair struktur laut. Metode ini melibatkan pengangkatan beton terdegradasi dan penggantian dengan mortar atau beton repair berkinerja tinggi.

Untuk aplikasi laut, material repair harus memiliki: Permeabilitas sangat rendah, Kuat lekat tinggi pada kondisi lembap, dan Ketahanan terhadap klorida dan sulfat. Studi terbaru menunjukkan bahwa polymer-modified repair mortar, geopolimer, dan ECC-based repair memberikan kinerja jauh lebih baik dibanding mortar konvensional di lingkungan laut (Courard, L., et al., 2021; Bernal, S.A., et al., 2021; Li, V.C., et al., 2023).

Tabel 10.2. Persyaratan Material Repair untuk Lingkungan Laut

Parameter	Kebutuhan Utama
Permeabilitas	Sangat rendah
Adhesi	Tinggi (basah)
Ketahanan klorida	Sangat tinggi
Ketahanan abrasi	Tinggi

10.5 Proteksi Korosi pada Infrastruktur Laut

Proteksi korosi merupakan elemen **paling kritis** dalam repair beton laut. Metode yang umum digunakan meliputi: Cathodic protection (CP), Galvanic anodes, dan Corrosion inhibitors.

Cathodic protection terbukti sebagai metode paling efektif untuk menghentikan korosi tulangan pada struktur laut dengan paparan klorida tinggi (Bertolini, L., et al., 2020; Christodoulou, C., et al., 2021; ISO 12696, 2020). Sistem CP banyak diterapkan pada dermaga, jembatan laut, dan struktur offshore dengan kinerja jangka panjang yang sangat baik.



Gambar 10.2. Sistem *Cathodic Protection* pada Struktur Laut, Skema perlindungan aktif tulangan beton bertulang di lingkungan laut melalui anoda pengorbanan atau arus searah eksternal untuk menekan korosi akibat penetrasi klorida dan memperpanjang umur layanan struktur. (diadaptasi dari Mehta & Monteiro, EN 206, fib Model Code 2020, dan Neville)

Sebagaimana telah dibahas pada bagian awal Bab 10, lingkungan laut merupakan salah satu kondisi paling agresif bagi struktur beton bertulang akibat kombinasi penetrasi ion klorida, kelembapan tinggi, dan ketersediaan oksigen. Ketika konsentrasi klorida pada selimut beton melampaui ambang kritis, lapisan pasif baja tulangan terdegradasi dan proses korosi elektrokimia tidak lagi dapat dicegah hanya dengan peningkatan mutu beton atau penambahan tebal selimut. Pada kondisi inilah strategi perlindungan aktif menjadi relevan.

Gambar 10.2 menunjukkan penerapan sistem *cathodic protection* (CP) sebagai metode pengendalian korosi tingkat lanjut yang secara langsung menargetkan mekanisme elektrokimia pada tulangan baja. Berbeda dengan pendekatan pasif yang dibahas pada subbab sebelumnya—seperti pemilihan material, perbaikan retak, dan pelapisan permukaan—sistem CP bekerja dengan memodifikasi potensial listrik tulangan sehingga reaksi oksidasi besi dapat ditekan secara efektif.

Pada sistem yang ditampilkan, tulangan baja difungsikan sebagai katoda, sedangkan anoda ditempatkan di luar sistem tulangan. Gambar ini mengilustrasikan dua pendekatan utama yang dibahas dalam Bab 10, yaitu *galvanic cathodic protection* dan *impressed current cathodic protection* (ICCP). Sistem galvanik memanfaatkan anoda pengorbanan yang secara alami terkorosi, sedangkan sistem ICCP menggunakan sumber arus searah eksternal sehingga tingkat proteksi dapat dikendalikan dan disesuaikan dengan tingkat agresivitas lingkungan.

Aliran elektron dari anoda menuju tulangan, sebagaimana digambarkan pada Gambar 10.2, menurunkan potensial baja hingga berada pada rentang aman terhadap korosi. Pemantauan potensial dilakukan menggunakan elektroda referensi untuk memastikan bahwa kriteria proteksi yang disyaratkan standar tetap terpenuhi selama masa layan struktur. Hal ini menegaskan

bahwa *cathodic protection* bukan sekadar metode perbaikan, melainkan bagian dari sistem manajemen durabilitas jangka panjang.

Dengan demikian, Gambar 10.2 memperkuat argumen utama Bab 10 bahwa pada struktur laut eksisting dengan tingkat kontaminasi klorida tinggi, pendekatan perlindungan aktif seperti *cathodic protection* sering kali menjadi solusi paling efektif dan berkelanjutan. Sistem ini memungkinkan perpanjangan umur layanan struktur tanpa perlu penggantian elemen secara masif, sekaligus meminimalkan risiko penurunan kapasitas struktural akibat korosi lanjutan.

10.6 Coating, Lining, dan Surface

Protection

Sistem coating dan lining berfungsi sebagai **penghalang fisik** terhadap penetrasi klorida dan air laut. Material yang umum digunakan meliputi:

- Coating berbasis epoksi,
- Poliuretan elastomerik,
- Sistem multi-layer khusus lingkungan laut.

Efektivitas coating sangat bergantung pada persiapan permukaan, ketebalan lapisan, dan kompatibilitas dengan beton substrat (Courard, L., 2022).

10.7 Teknologi Repair Inovatif untuk Infrastruktur Laut

Infrastruktur laut modern semakin banyak memanfaatkan material inovatif, antara lain: ECC overlays untuk kontrol retak dan daktilitas, Geopolymer repair systems untuk ketahanan kimia

tinggi, dan Ultra - High Performance Concrete (**UHPC**) untuk zona abrasi ekstrem. ECC dan UHPC menunjukkan ketahanan unggul terhadap penetrasi klorida dan abrasi, menjadikannya solusi potensial untuk repair jangka panjang di lingkungan laut (Yu, K., et al., 2023; Graybeal, B., 2020; Shi, C., et al., 2021).

Tabel 10.3. Teknologi Repair Inovatif untuk Lingkungan Laut

Teknologi	Keunggulan Utama	Aplikasi
ECC	Kontrol retak mikro	Overlay struktural
Geopolymer	Tahan kimia	Patch repair
UHPC	Abrasi ekstrem	Zona splash

10.8 Monitoring dan Manajemen Aset Infrastruktur Laut

Keberhasilan repair beton laut sangat bergantung pada monitoring jangka panjang, meliputi: Pengukuran potensial korosi, Resistivitas beton, dan Inspeksi visual berbasis drone dan sensor. Pendekatan asset management berbasis data memungkinkan optimasi jadwal repair dan pemeliharaan, sehingga biaya siklus hidup infrastruktur laut dapat ditekan secara signifikan (Gucunski, N., et al., 2022; Washer, G., et al., 2021; Xu, L.Y., et al., 2024; Stewart, M.G., 2022).

10.9 Ringkasan Bab

10.8.1 Karakteristik Lingkungan Laut terhadap Beton

Lingkungan laut dibagi menjadi empat zona eksposur:

Zona	Karakteristik	Risiko Korosi
Submerged	Terendam permanen	Sedang
Tidal	Pasang surut	Tinggi
Splash	Terkena percikan	Sangat tinggi
Atmospheric	Uap garam	Sedang

Konsentrasi klorida air laut:

$$C_{cl} \approx 18,000 - 20,000 \text{ mg/L}$$

Ambang korosi tulangan:

$$C_{crit} \approx 0.4 - 1.0\% \text{ berat semen}$$

Zona splash memiliki risiko tertinggi karena kombinasi oksigen + klorida + siklus kering-basah → mempercepat laju korosi.

10.8.2 Mekanisme Kerusakan Beton di Lingkungan Laut

Difusi Klorida

Model Fick's Second Law:

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cft}t}} \right) \right] \quad (10-1)$$

Dimana:

- $D_{cff} = 10^{-12} - 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (beton konvensional)
- C_s = Konsentrasi permukaan
- x = tebal selimut beton

Waktu inisiasi korosi:

$$t_i \propto \frac{x^2}{D_{cff}} \quad (10-2)$$

Jika selimut 40 mm dan $D_{cff} = 1 \times 10^{-11}$:

$$t_i \approx 8 - 15 \text{ tahun}$$

Sulfate Attack & Abrasi

Zona submerged rentan terhadap:

$$\text{Expansion}_{\text{ettringite}} \rightarrow \text{cracking} \quad (10-3)$$

Sementara zona splash:

- Abrasi mekanis 0.1-1.0 mm/tahun

BAB 11

PELAKSANAAN, QUALITY CONTROL DAN EVALUASI KINERJA REPAIR BETON

Keberhasilan teknologi repair beton tidak hanya ditentukan oleh kualitas desain dan pemilihan material, tetapi sangat bergantung pada pelaksanaan di lapangan, sistem quality control (QC), serta evaluasi kinerja pasca-repair. Berbagai laporan kegagalan repair menunjukkan bahwa lebih dari 60% kegagalan repair beton disebabkan oleh pelaksanaan dan QC yang tidak memadai, bukan oleh mutu material atau konsep desain (Emmons, P.H., Vaysburd, A.M., 2020; Beushausen, H., Alexander, M., 2023; Courard, L., et al., 2021). Dalam konteks manajemen aset infrastruktur modern, pelaksanaan repair beton harus dipandang sebagai proses sistematis berbasis kinerja, di mana setiap tahapan pekerjaan berkontribusi langsung terhadap umur layanan dan keandalan struktur.

11.1 Prinsip Umum Pelaksanaan Repair Beton

Pelaksanaan repair beton harus mengikuti prinsip “repair as an integrated system”, bukan sebagai pekerjaan tambal-sulam terpisah. Standar EN 1504 dan ACI 562 menekankan bahwa setiap tahapan—mulai dari inspeksi akhir sebelum repair, persiapan permukaan, aplikasi material, hingga curing—harus direncanakan dan dikendalikan secara terpadu (EN 1504-9, 2020; ACI 562, 2021). Prinsip umum pelaksanaan repair beton meliputi: Kepatuhan penuh terhadap desain repair, Pengendalian kondisi lingkungan kerja, Keselamatan kerja dan perlindungan struktur eksisting, dan Keterlacakan (traceability) seluruh proses pekerjaan.



Gambar 11.1. Tahapan pelaksanaan pekerjaan repair beton sebagai suatu sistem terpadu yang mencakup persiapan permukaan, aplikasi material repair, curing, dan perlindungan awal untuk menjamin kinerja jangka panjang (*diadaptasi dari EN 1504, 2020; ACI 562, 2021 dan ACI 546R, 2021*).

Alur pelaksanaan pekerjaan repair beton yang diperlakukan sebagai satu sistem terpadu, bukan sekadar rangkaian aktivitas terpisah. Pendekatan sistemik ini menegaskan bahwa keberhasilan repair beton sangat bergantung pada konsistensi dan keterkaitan antar tahapan pelaksanaan.

Tahap pertama adalah persiapan permukaan, yang meliputi pengangkatan beton terdegradasi, pembersihan kontaminan, dan pembentukan kekasaran permukaan yang memadai. Tahap ini bertujuan menciptakan kondisi optimal untuk terjadinya ikatan yang kuat antara beton eksisting dan material repair.

Tahap berikutnya adalah aplikasi material repair, yang harus dilakukan sesuai spesifikasi desain dan rekomendasi pabrikan. Parameter penting seperti ketebalan lapisan, metode aplikasi, dan kondisi lingkungan harus dikendalikan untuk mencegah cacat awal.

Setelah aplikasi, dilakukan curing dan perlindungan awal, yang berfungsi mengendalikan shrinkage dini, memastikan hidrasi atau reaksi pengikatan berjalan optimal, serta melindungi material repair dari gangguan lingkungan seperti pengeringan cepat, hujan, atau getaran.

Secara keseluruhan, gambar ini menegaskan bahwa setiap tahapan pelaksanaan repair beton saling bergantung dan secara kolektif menentukan kinerja struktural dan durabilitas jangka panjang dari sistem repair yang diterapkan.

11.2 Persiapan Permukaan Beton dan Tulangan

Persiapan permukaan merupakan tahapan paling kritis dalam pelaksanaan repair beton dan berkontribusi langsung terhadap kuat lekat dan durabilitas repair. Tujuan utama persiapan permukaan adalah: Menghilangkan beton terdegradasi dan lapisan lemah, Menghilangkan kontaminan (klorida, minyak, debu), dan Menciptakan kekasaran permukaan yang memadai untuk ikatan mekanis

Metode persiapan permukaan yang umum digunakan meliputi: Chipping mekanis, Sandblasting, Water jetting, dan Hydrodemolition.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa hydrodemolition menghasilkan antarmuka beton-repair dengan kualitas terbaik, karena mampu menghilangkan beton rusak tanpa menimbulkan

microcracking tambahan (Momber, A., 2021; De Belie, N., et al., 2022).

Tabel 11.1. Metode Persiapan Permukaan dan Karakteristiknya

Metode	Kualitas Antarmuka	Risiko Microcracking	Aplikasi Umum
Chipping	Sedang	Tinggi	Repair kecil
Sandblasting	Sedang-baik	Rendah	Permukaan
Water jetting	Baik	Rendah	Umum
Hydrodemolition	Sangat baik	Sangat rendah	Repair struktural

Tabel ini menunjukkan bahwa pemilihan metode persiapan permukaan harus disesuaikan dengan tingkat kerusakan dan tuntutan kinerja repair.

11.3 Aplikasi Material Repair dan Curing

Aplikasi material repair harus mengikuti spesifikasi teknis dan rekomendasi pabrikan, terutama terkait: Rasio air dan konsistensi, Ketebalan lapisan maksimum, dan Waktu kerja dan waktu ikat. Kesalahan umum di lapangan adalah penambahan air berlebih untuk meningkatkan workability, yang secara signifikan menurunkan kuat lekat dan durabilitas repair (Bentz, D.P., et al., 2020; Hooton, R.D., et al., 2022).

Curing merupakan aspek krusial, khususnya untuk material berbasis semen. Curing yang tidak memadai meningkatkan risiko: Shrinkage dini, Retak permukaan, dan Penurunan ketahanan terhadap klorida dan karbonasi.



Gambar 11.2. Alur quality control (QC) pekerjaan repair beton mulai dari pemeriksaan material, pengendalian proses pelaksanaan, hingga verifikasi mutu hasil akhir repair (*diadaptasi dari EN 1504, 2020; ACI 562, 2021; ASTM C1583, 2020; dan fib Model Code 2020*)

Alur sistem quality control (QC) pada pekerjaan repair beton yang dirancang untuk menjamin bahwa seluruh tahapan pelaksanaan memenuhi spesifikasi desain dan target kinerja. Diagram ini menegaskan bahwa QC repair beton harus dilakukan secara berlapis dan berkesinambungan, bukan hanya pada tahap akhir pekerjaan.

Tahap awal QC dimulai dengan pemeriksaan material repair, meliputi verifikasi sertifikat material, kesesuaian spesifikasi teknis, serta pengujian awal seperti workability dan waktu ikat. Tahap ini

bertujuan memastikan bahwa material yang digunakan sesuai dengan desain repair dan kondisi lapangan.

Tahap berikutnya adalah QC selama proses pelaksanaan, yang mencakup pengendalian persiapan permukaan, kebersihan tulangan, ketebalan lapisan repair, metode aplikasi, serta kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Pengendalian proses ini sangat penting untuk mencegah kegagalan akibat kesalahan pelaksanaan meskipun material yang digunakan berkualitas tinggi.

Tahap akhir adalah verifikasi mutu hasil repair, yang dilakukan melalui inspeksi visual, pengujian kuat tekan atau kuat tarik, serta pengujian kuat lekat menggunakan pull-off test. Hasil verifikasi ini digunakan untuk menilai apakah sistem repair telah memenuhi kriteria penerimaan dan siap memasuki fase evaluasi kinerja pasca-repair. Secara keseluruhan, gambar ini menegaskan bahwa quality control merupakan elemen kunci dalam keberhasilan repair beton dan menjadi penghubung antara desain teknis, pelaksanaan lapangan, serta kinerja jangka panjang struktur.

11.4 Quality Control (QC) pada Pekerjaan Repair Beton

Quality control bertujuan memastikan bahwa material, proses, dan hasil akhir memenuhi persyaratan desain dan standar teknis. QC repair beton mencakup tiga level utama: (Van Breugel, K., et al., 2021). QC material, QC proses pelaksanaan, dan QC hasil akhir repair.

Pengujian QC yang umum dilakukan meliputi: Uji workability dan waktu ikat, Uji kuat tekan dan kuat tarik, Pull-off test untuk evaluasi kuat lekat, dan Pemeriksaan visual dan ketebalan lapisan.

Standar EN 1504 dan ASTM C1583 merekomendasikan pull-off test sebagai indikator utama kualitas antarmuka repair (ASTM C1583, 2020; EN 1542, 2021).

Tabel 11.2. Parameter QC Repair Beton dan Metode Uji

Parameter	Metode Uji	Tujuan
Workability	Slump/flow	Konsistensi
Kuat tekan	Compression test	Kapasitas
Kuat lekat	Pull-off test	Adhesi
Ketebalan	Visual/ukur	Kesesuaian desain

11.5 Quality Control Berbasis Kinerja (Performance-Based QC)

Pendekatan modern mengarah pada performance-based QC, di mana parameter durabilitas jangka panjang menjadi bagian dari evaluasi mutu. Parameter tersebut meliputi: Permeabilitas dan sorptivity, Ketahanan klorida, dan Stabilitas retak. Pendekatan ini memberikan gambaran lebih realistis terhadap kinerja repair sepanjang umur layanan, bukan hanya pada umur awal.

11.6 Evaluasi Kinerja Pasca-Repair

Evaluasi kinerja pasca-repair bertujuan memastikan bahwa sistem repair memenuhi tujuan desain. Evaluasi dilakukan melalui: Inspeksi visual berkala, Pengujian non-destruktif (UPV, rebound), dan Pengukuran potensi dan laju korosi. Evaluasi berkala sangat penting untuk struktur strategis dan lingkungan agresif (fib Model Code 2020).



Gambar 11.3. Skema evaluasi kinerja pasca-repair beton berbasis inspeksi visual, pengujian non-destruktif, dan monitoring jangka panjang untuk memastikan tercapainya tujuan desain repair (*diadaptasi dari EN 1504, 2021; ACI 562, 2021 dan fib Model Code 2020*).

Tahapan evaluasi kinerja pasca-repair beton sebagai bagian penting dari siklus teknologi repair beton modern. Evaluasi ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem repair yang diterapkan telah memenuhi tujuan desain, baik dari aspek struktural maupun durabilitas jangka panjang.

Tahap pertama adalah inspeksi visual, yang bertujuan mendeteksi indikasi awal kegagalan seperti retak ulang, delaminasi, perubahan warna, atau kerusakan permukaan. Inspeksi ini berfungsi sebagai metode cepat untuk menilai kondisi umum hasil repair dan menentukan kebutuhan pengujian lanjutan.

Tahap kedua melibatkan pengujian non-destruktif (NDT), seperti ultrasonic pulse velocity, rebound hammer, atau pengukuran potensial korosi, untuk mengevaluasi kualitas material repair, integritas antarmuka beton-repair, serta kondisi tulangan tanpa merusak struktur.

Tahap ketiga adalah monitoring jangka panjang, yang mencakup pemantauan parameter kinerja seperti stabilitas retak, permeabilitas, dan laju korosi tulangan. Data monitoring digunakan untuk mengevaluasi efektivitas repair dalam jangka waktu tertentu dan menjadi dasar pengambilan keputusan pemeliharaan lanjutan.

Secara keseluruhan, gambar ini menegaskan bahwa keberhasilan repair beton tidak hanya ditentukan pada saat pelaksanaan, tetapi harus diverifikasi melalui evaluasi kinerja berkelanjutan yang terintegrasi dengan manajemen aset dan pendekatan berbasis umur layanan.

11.7 Monitoring Jangka Panjang dan Manajemen Aset

Monitoring jangka panjang merupakan komponen utama life-cycle management infrastruktur beton. Teknologi modern meliputi: Sensor korosi tertanam, Monitoring kelembapan dan resistivitas beton, dan Inspeksi berbasis drone dan AI. Pendekatan ini memungkinkan deteksi dini kegagalan repair dan optimasi biaya pemeliharaan (Bastidas-Arteaga, E., 2023).

11.8 Dokumentasi dan Evaluasi Kegagalan Repair

Dokumentasi lengkap terhadap: Metode pelaksanaan, Data QC, dan Hasil evaluasi pasca-repair, merupakan sumber pembelajaran penting. Analisis kegagalan repair memberikan umpan balik langsung untuk peningkatan desain dan praktik repair beton di masa depan (Alexander, M., et al., 2022; Masi, A., et al., 2023).

11.9 Pelaksanaan, Quality Control, dan Evaluasi Kinerja Repair Beton

11.9.1 Kerangka Kuantitatif Quality Control (QC) Repair Beton

Quality control dalam pekerjaan repair beton harus didasarkan pada **parameter terukur** (Key Performance Indicators/KPI) yang terkait langsung dengan **kinerja jangka panjang**. Untuk repair beton berbasis durabilitas, tiga kelompok KPI utama yang harus dipantau adalah:

1. **Kuat lekat antarmuka** (bond strength) → diuji dengan **pull-off test**
2. **Permeabilitas / kemampuan transport:**
 - sorptivitas (S)
 - koefisien difusi klorida D_{cl} atau **migration coefficient**
3. Indikator elektrokimia korosi
 - **laju korosi** i_{corr}
 - **potensial korosi**
 - kadang dinyatakan sebagai **k_{Cl} efektif** (koefisien transport klorida)

QC modern tidak lagi berhenti pada **kuat tekan mortar**, tetapi harus menilai **kemampuan sistem repair menahan masuknya air/ion agresif dan mengendalikan korosi**.

11.9.2 KPI Utama & Acceptance Criteria Kuantitatif

Kuat Lekat (Pull-Off Strength, f_{bond})

Pull-Off test mengukur tegangan maksimum tarik normal di antarmuka beton eksisting-material repair.

$$f_{bond} = \frac{F_{max}}{A} \quad (11-1)$$

Dengan:

- F_{max} = gaya maksimum (N)
- A = luas pad (mm^2)
- f_{bond} = MPa

Acceptance criteria tipikal (referensi EN 1504 / praktik Eropa-ACI, disesuaikan konteks):

Jenis repair	Fungsi	$f_{bond,mean}$ (MPa)	$f_{bond,min}$ (MPa)
Non-struktural (kosmetik, cover)	Protektif	$\geq 1,0$	$\geq 0,7$
Struktural ringan (balok/plat)	Load sharing	$\geq 1,5$	$\geq 1,0$
Struktural berat / overlay lalu lintas	Load transfer signifikan	$\geq 2,0$	$\geq 1,5$

Catatan: Kegagalan yang diinginkan adalah “failure in beton lama” (substrate failure), bukan di lapisan repair atau lem pull-off.

11.9.3 Sorptivitas & Penyerapan Air

Sorptivitas (S) menyatakan kecepatan penyerapan air melalui kapiler.

$$i(t) = S \sqrt{t} + c \quad (11-2)$$

Dengan:

- $i(t)$ = kumulatif penyerapan air per satuan luas (mm)
- S = Sorptivitas (mm/ $\sqrt{\text{jam}}$ atau mm/ $\sqrt{\text{s}}$)

Acceptance criteria realistis:

Material	S (mm/ $\sqrt{\text{jam}}$)
OPC biasa	0,15-0,25
HPC / mortar low-permeability	0,05-0,10
Repair mortar berkinerja tinggi / ECC	$\leq 0,05$

Target untuk repair durabilitas (marin / klorida / kimia):

$$S \leq 0,08 \text{ mm}/\sqrt{\text{jam}}$$

11.9.4 Koefisien Difusi / Migration Klorida D_{cl}

Nilai D_{cl} dapat diperoleh dari:

- Uji difusi (NT Build 443 / ponding test), atau
- **Rapid chloride migration test** (NT Build 492), dikonversi ke D_{nssm}

Secara umum:

- Beton biasa: $D_{cl} \sim 1-3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
- HPC / repair mortar: $3-8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$
- ECC / UHPC: $\leq 1 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$

Acceptance criteria (untuk overlay/patch di lingkungan klorida):

Tingkat Durabilitas	D_{cl} (m ² /s)
Minimum (OPC biasa)	$\leq 2 \times 10^{-12}$
Baik (HPC)	$\leq 8 \times 10^{-13}$
Sangat baik (repair durabilitas)	$\leq 3 \times 10^{-13}$

11.9.5 Indikator Korosi: i_{corr} & Potensial

Umumnya:

i_{corr} (μA/cm ²)	Kondisi
$\leq 0,1$	Baja pasif
0,1-0,5	Korosi rendah
0,5-1,0	Korosi sedang
$> 1,0$	Korosi tinggi

Acceptance umum:

- Target pasca-repair:

$$i_{corr,target} \leq 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$
- Atau bahkan $\leq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ untuk struktur strategis + CP

11.9.6 Contoh Hitung Pull-Off & Evaluasi Lot Repair

Misal dilakukan pull-off test pada overlay repair struktural (deck jembatan). Data hasil uji 6 titik:

Titik	Gaya (kN)	Luas pad (50 mm Ø)	f_{bond} (MPa)
1	3,9	1963 mm ²	1,99
2	3,5	1963 mm ²	1,78
3	4,1	1963 mm ²	2,09
4	3,7	1963 mm ²	1,89
5	3,2	1963 mm ²	1,63
6	4,0	1963 mm ²	2,04

Hitung rata-rata dan minimum:

$$f_{bond,mean} = \frac{\sum f_{bond}}{6} = \frac{1,99 + 1,78 + 2,09 + 1,89 + 1,63 + 2,04}{6}$$

$$\approx 1,90 \text{ MPa}$$

$$f_{bond,mean} = 1,63 \text{ MPa}$$

Bandingkan dengan kriteria overlay struktural:

- Syarat: $f_{bond,mean} \geq 1,5 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK}$
- Syarat: $f_{bond,mean} \leq 1,0 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK}$

Jika 1 titik jatuh < 1,0 MPa, area tersebut harus **dievaluasi**:

- Cek preparation surface
- Cek curing
- Koreksi prosedur sebelum melanjutkan volume besar

11.9.7 Contoh Hitung Sorptivitas & Kriteria

Hasil uji sorptivitas mortar repair (kelompok 3 silinder):

Waktu (jam)	i (mm)
1	1,2
4	2,3
9	3,4

Regresi linier i vs $\sqrt{t}$:

$\sqrt{t}$	i (mm)
1,00	1,2
2,00	2,3
3,00	3,4

Karena hampir linear:

$$S \approx \frac{\Delta i}{\Delta \sqrt{t}} = \frac{3,4 - 1,2}{3 - 1} = \frac{2,2}{2} = 1,1 \text{ mm}/\sqrt{\text{jam}}$$

Nilai ini **terlalu tinggi** (kelas beton sangat permeabel). Untuk mortar repair durabilitas, target $S \leq 0,08 \text{ mm}/\sqrt{\text{jam}}$ → artinya desain mix atau w/c ratio, aditif, dan curing **harus diperbaiki**.

Jika hasil uji HPC/ECC repair menunjukkan:

$$S = 0,05 \text{ mm} / \sqrt{\text{jam}}$$

→ **memenuhi** kriteria untuk struktur maritim / lingkungan klorida.

11.9.8 Contoh Hitung Sederhana Koefisien Klorida dari Dara Uji

Misal dari uji difusi (profil klorida) didapat:

$$C_{x,t} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t}} \right) \right] \quad (11-3)$$

Data hasil uji (umur 90 hari, $t = 0,246$ tahun):

- $x = 10 \text{ mm} \rightarrow C = 0,9\%$
- $C_s = 1,2$

$$\frac{C}{C_s} = \frac{0,9}{1,2} = 0,75 \Rightarrow 1 - \operatorname{erf}(\eta) = 0,75 \Rightarrow \operatorname{erf}(\eta) = 0,25 \Rightarrow \eta \approx 0,225$$

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \sqrt{Dt} = \frac{x}{2\eta} = \frac{0,01}{2 \times 0,225} \approx 0,0222$$

$$Dt = 4,93 \times 10^{-4} \Rightarrow D = \frac{4,93 \times 10^{-4}}{0,16} \approx 2,00 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{tahun}$$

Konversi ke m^2/s :

$$D \approx \frac{2,00 \times 10^{-3}}{3,15 \times 10^7} \approx 6,3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

Nilai ini terlalu besar untuk material repair low-permealibity (target $\leq 3 \times 10^{-13}$). Artinya:

- Mix design dan curing perlu ditingkatkan, atau
- Dilakukan kombinasi **coating/overlay** tambahan.

11.9.10 Matriks QC Kuantitatif – Contoh Tabel “Go / No Go”

Dalam pekerjaan repair beton, keberhasilan intervensi tidak hanya ditentukan oleh proses pelaksanaan di lapangan, tetapi juga oleh sistem pengendalian mutu (Quality Control / QC) yang mampu memastikan bahwa material dan metode yang digunakan benar-benar memenuhi kriteria kinerja yang telah ditetapkan. Salah satu pendekatan yang semakin banyak digunakan dalam praktik teknik adalah matriks QC kuantitatif berbasis “Go / No Go”, yaitu sistem evaluasi yang menetapkan nilai ambang (threshold) untuk setiap parameter kinerja. Jika hasil pengujian berada dalam batas yang dipersyaratkan, maka pekerjaan dinyatakan “Go” atau diterima; sebaliknya, jika tidak memenuhi kriteria maka dinyatakan “No Go” dan memerlukan tindakan korektif seperti perbaikan ulang atau penggantian material.

Pada contoh matriks di atas, beberapa parameter utama yang berkaitan dengan durabilitas dan kualitas ikatan repair digunakan sebagai indikator evaluasi. Parameter pull-off strength digunakan untuk menilai kekuatan ikatan antara material repair dan beton substrat. Nilai rata-rata minimal sebesar 1,5 MPa dan nilai minimum 1,0 MPa menunjukkan bahwa lapisan repair memiliki adhesi yang cukup untuk menahan tegangan tarik yang mungkin terjadi selama masa layanan. Selain itu, parameter **sorptivitas (S)** digunakan untuk mengukur kemampuan material menyerap air melalui mekanisme kapiler. Nilai sorptivitas yang rendah menunjukkan bahwa mikrostruktur material cukup rapat sehingga penetrasi air dan zat agresif dapat diminimalkan.

Parameter lain yang sangat penting dalam matriks ini adalah koefisien difusi klorida (D_{cl}) dan laju korosi tulangan (i_{corr}). Nilai D_{cl} yang lebih kecil dari batas target menunjukkan bahwa material repair memiliki ketahanan yang baik terhadap penetrasi ion klorida, yang merupakan salah satu penyebab utama korosi tulangan pada struktur beton. Sementara itu, nilai i_{corr} yang rendah mengindikasikan bahwa aktivitas korosi tulangan berada pada tingkat yang sangat kecil atau terkendali. Dengan mengombinasikan parameter mekanik, transportasi fluida, dan indikator korosi dalam satu matriks evaluasi, sistem QC ini memungkinkan penilaian yang lebih komprehensif terhadap kualitas pekerjaan repair. Pendekatan ini juga membantu memastikan bahwa hasil perbaikan tidak hanya memenuhi persyaratan kekuatan awal, tetapi juga mampu memberikan kinerja durabilitas yang memadai selama masa layanan struktur.

BAB 12

STUDI KASUS, BEST PRACTICE, DAN ARAH MASA DEPAN TEKNOLOGI REPAIR BETON

Sintesis komprehensif penerapan teknologi repair beton melalui studi kasus terpilih, perumusan best practice berbasis standar internasional, serta pembahasan arah masa depan teknologi repair beton. Pendekatan ini bertujuan menjembatani kesenjangan antara teori, riset mutakhir, dan praktik lapangan, sekaligus memberikan kerangka strategis bagi akademisi, praktisi, dan pengelola aset infrastruktur dalam merancang solusi repair beton yang andal, berkelanjutan, dan adaptif terhadap tantangan masa depan.

12.1 Peran Studi Kasus dalam Pengembangan Teknologi Repair Beton

Studi kasus memainkan peran krusial dalam pengembangan teknologi repair beton karena menyediakan bukti kinerja jangka panjang pada kondisi lapangan yang kompleks dan tidak sepenuhnya dapat direplikasi di laboratorium. Banyak teknologi repair menunjukkan performa sangat baik pada skala laboratorium, namun gagal memenuhi ekspektasi di lapangan akibat variasi lingkungan, mutu pelaksanaan, serta interaksi antarmekanisme kerusakan.

Analisis studi kasus memungkinkan: Evaluasi keberlanjutan kinerja repair, Identifikasi faktor kegagalan yang berulang, dan Penyusunan best practice berbasis bukti empiris.

12.2 Studi Kasus Repair Beton pada Infrastruktur Perkotaan

Infrastruktur perkotaan seperti gedung bertingkat, jembatan layang, dan fasilitas transportasi mengalami degradasi akibat kombinasi beban lalu lintas tinggi, polusi, karbonasi cepat, dan

keterbatasan akses perawatan. Studi kasus di Eropa dan Asia menunjukkan bahwa repair berbasis diagnosis mekanisme dan desain umur layanan mampu memperpanjang umur struktur hingga 20–30 tahun.

Pendekatan yang terbukti efektif meliputi: Patch repair selektif berbasis mekanisme, Corrosion inhibitor terintegrasi, dan Sistem coating protektif jangka panjang.

Tabel 12.1. Ringkasan Studi Kasus Repair Beton Infrastruktur Perkotaan

Jenis Struktur	Mekanisme Dominan	Teknologi Repair	Hasil Jangka Panjang
Gedung tinggi	Karbonasi, retak	Patch + coating	Umur ↑ 25 tahun
Flyover	Korosi klorida	Inhibitor + overlay	LCC ↓ signifikan
Stasiun	Retak & bocor	Injection + lining	Durabilitas ↑

Tabel ini menunjukkan bahwa keberhasilan repair sangat bergantung pada kecocokan teknologi dengan mekanisme kerusakan dominan.

12.3 Studi Kasus Infrastruktur Laut dan Pesisir

Studi kasus pada dermaga, jembatan laut, dan struktur offshore menunjukkan bahwa pendekatan parsial hampir selalu gagal di lingkungan laut. Infrastruktur yang hanya mengandalkan patch repair tanpa proteksi korosi aktif umumnya mengalami kerusakan ulang dalam waktu singkat.

Pendekatan paling efektif mencakup: Cathodic protection jangka panjang, Material repair berkinerja tinggi (ECC, UHPC), dan Sistem monitoring korosi berkelanjutan.



Gambar 12.1. Sintesis best practice teknologi repair beton berbasis integrasi diagnosis, desain berbasis durabilitas, pemilihan material, pelaksanaan, dan monitoring kinerja sepanjang siklus hidup struktur (*diadaptasi dari ACI 562, EN 1504, fib Model Code 2020, dan Stewart*).

Kerangka konseptual best practice teknologi repair beton yang menempatkan repair sebagai bagian integral dari manajemen siklus hidup struktur, bukan sekadar tindakan perbaikan lokal. Diagram ini menunjukkan hubungan berurutan dan saling terkait antara lima elemen utama, yaitu diagnosis kerusakan, desain repair, pemilihan material, pelaksanaan dan quality control, serta monitoring pasca-repair.

Tahap diagnosis menjadi fondasi utama, di mana mekanisme kerusakan, tingkat keparahan, dan implikasinya terhadap kinerja struktur diidentifikasi secara komprehensif. Hasil diagnosis kemudian diterjemahkan ke dalam desain repair berbasis kompatibilitas, durabilitas, dan umur layanan, sesuai dengan prinsip yang direkomendasikan standar internasional.

Pemilihan material repair dilakukan sebagai konsekuensi langsung dari desain, dengan mempertimbangkan kompatibilitas mekanik, termal, dan kimia terhadap beton eksisting. Selanjutnya, pelaksanaan dan quality control memastikan bahwa sistem repair terimplementasi sesuai desain, dengan pengendalian mutu yang ketat untuk mencegah kegagalan dini.

Tahap terakhir adalah monitoring dan evaluasi kinerja, yang berfungsi sebagai umpan balik untuk menilai efektivitas repair dan mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan selanjutnya. Secara keseluruhan, gambar ini menegaskan bahwa keberhasilan teknologi repair beton hanya dapat dicapai melalui pendekatan terintegrasi, berbasis kinerja, dan berorientasi jangka panjang.

12.4 Studi Kasus Lingkungan Industri dan Limbah

Lingkungan industri dan instalasi pengolahan limbah menghadirkan kondisi degradasi kimia ekstrem, termasuk serangan asam dan biodeterioration. Studi kasus menunjukkan bahwa mortar semen konvensional hampir selalu gagal pada kondisi ini.

Solusi yang terbukti efektif meliputi: Geopolymer repair materials, Acid-resistant lining berbasis polimer, dan Sistem proteksi permukaan berlapis.

12.5 Sintesis Best Practice Teknologi Repair Beton

Berdasarkan sintesis lintas studi kasus dan literatur terbaru best practice teknologi repair beton dapat dirumuskan sebagai berikut: Diagnosis berbasis mekanisme, bukan gejala visual semata. Desain repair berbasis durabilitas dan umur layanan, bukan solusi sementara. Material repair kompatibel secara mekanik, termal, dan kimia. Pelaksanaan dan QC disiplin, dengan pengujian antarmuka dan kinerja. dan Monitoring dan manajemen aset jangka panjang.

Tabel 12.2. Best Practice Teknologi Repair Beton

Tahap	Prinsip Best Practice	Dampak
Diagnosis	Multi-metode	Akurasi tinggi
Desain	Service-life based	Umur ↑
Material	Compatibility-based	Risiko ↓
QC	Performance-based	Kinerja stabil
Monitoring	Berkelanjutan	LCC ↓

12.6 Peran Standar dan Regulasi Internasional

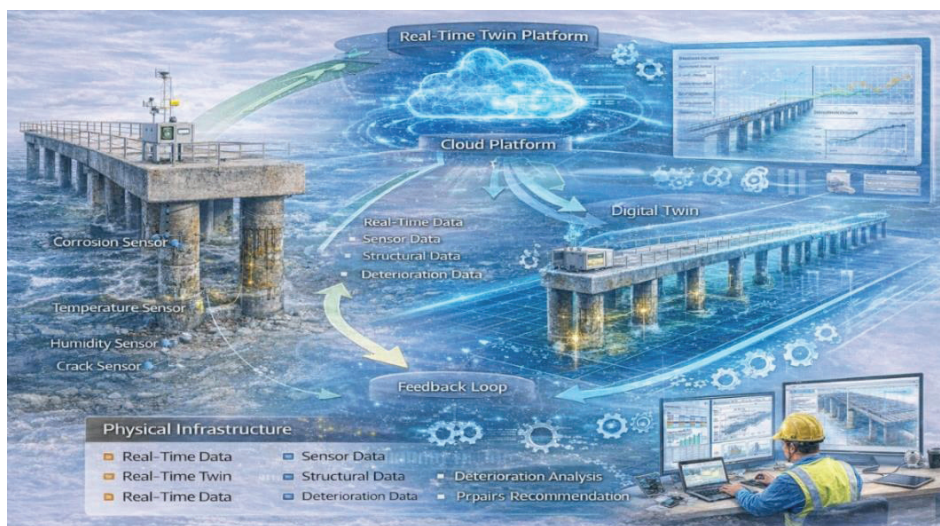
Standar internasional seperti EN 1504, ACI 562, fib Model Code 2020, dan ISO durabilitas struktur mendorong pergeseran paradigma dari repair reaktif menuju preventive dan performance-based repair.

Standar ini berfungsi sebagai: Kerangka teknis minimum, Alat harmonisasi praktik global, dan Dasar pengambilan keputusan berbasis risiko.

12.7 Digitalisasi dan Teknologi Cerdas dalam Repair Beton

Masa depan teknologi repair beton ditandai oleh integrasi: Building Information Modeling (BIM), Sensor pintar dan IoT, dan Digital twins dan AI-based analytics.

Teknologi ini memungkinkan: Diagnosis presisi tinggi, Monitoring kinerja real-time, dan Optimasi strategi repair berbasis data.



Gambar 12.2. Konsep digital twin untuk manajemen repair beton berbasis integrasi sensor, Building Information Modeling (BIM), dan analitik berbasis data dalam siklus hidup struktur beton (diadaptasi dari fib Model Code 2020, ISO 23247, dan Stewart & Melchers).

Konsep digital twin sebagai pendekatan mutakhir dalam manajemen repair beton, di mana kondisi fisik struktur direpresentasikan secara digital dan diperbarui secara kontinu berdasarkan data lapangan. Sistem ini mengintegrasikan sensor struktural, model BIM, dan analitik berbasis data untuk mendukung pengambilan keputusan repair yang berbasis kinerja dan umur layanan.

Sensor yang terpasang pada struktur beton berfungsi memantau parameter kunci seperti retak, kelembapan, penetrasi klorida, potensial korosi, dan deformasi, yang kemudian dikirimkan secara real-time ke model digital. Model BIM berperan sebagai platform visual dan basis data geometri-material, sementara digital twin merepresentasikan perilaku struktur aktual sepanjang siklus hidupnya.

Melalui integrasi ini, engineer dapat melakukan prediksi degradasi, mengevaluasi efektivitas sistem repair, serta mengoptimalkan strategi pemeliharaan berbasis risiko dan biaya siklus hidup. Pendekatan digital twin memungkinkan pergeseran paradigma dari repair reaktif menuju preventive dan predictive repair, yang terbukti meningkatkan keandalan struktur dan menurunkan biaya siklus hidup infrastruktur beton secara signifikan.

12.8 Material Repair Masa Depan dan Keberlanjutan

Material repair masa depan diarahkan pada: Low-carbon repair materials, Self-healing systems, dan Multi-functional materials (repair + sensing).

ECC generasi baru, geopolimer berbasis limbah industri, dan material repair dengan kemampuan self-monitoring menjadi fokus utama riset global.

Pendekatan ini sejalan dengan: Target net-zero emission, Prinsip ekonomi sirkular, dan Infrastruktur berkelanjutan.

12.9 Tantangan dan Agenda Riset Mendatang

Tantangan utama teknologi repair beton ke depan meliputi: Standarisasi material inovatif, Validasi kinerja jangka panjang, Kesiapan industri dan SDM, Integrasi teknis-ekonomi-lingkungan. Agenda riset mendatang perlu menekankan uji lapangan jangka panjang, pengembangan model prediksi berbasis data, dan harmonisasi standar internasional.

12.10 Model Kuantitatif LCC & CO₂ Saving pada Teknologi Repair Beton

Paradigma Life Cycle Thinking pada Repair Beton

Pendekatan konvensional dalam pengelolaan struktur beton sering hanya mempertimbangkan **biaya awal** (*initial cost*). Namun studi internasional menunjukkan bahwa:

- **65–85% total biaya struktur beton terjadi pada fase operasi, pemeliharaan, dan repair**
- Keputusan repair yang salah dapat meningkatkan biaya siklus hidup hingga **2–3 kali**
- Repair berbasis durabilitas mampu menurunkan **total biaya siklus hidup (LCC)** sekaligus **emisi CO₂ kumulatif**

Oleh karena itu, repair beton modern harus dievaluasi menggunakan:

- **Life Cycle Cost Analysis (LCCA)**
- **Life Cycle Assessment (LCA – CO₂)**

12.2 Model Umum Life Cycle Cost (LCC)

12.2.1 Persamaan Dasar LCC

$$LCC = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (12-1)$$

Dengan:

- C_0 = biaya awal (repair / rekonstruksi)
- C_t = biaya pemeliharaan / repair ulang pada tahun ke- t
- r = discount rate (umumnya 4-8%)
- n = umur analisis (tahun)

12.3 Skenario Perbandingan (Numerik Nyata)

Struktur studi

- Pelat beton jembatan
- Luas = **1.000 m²**
- Umur rencana = **50 tahun**
- Lingkungan = **klorida (urban/laut ringan)**

Skenario A – Rekonstruksi Penuh

Parameter	Nilai
Biaya awal	Rp. 5.000.000/m ²
Total C_0	Rp. 5,0 M
Umur layanan	40 tahun
Repair tambahan	Minor di tahun ke-25
Discount rate	6%

LCC Skenario A

$$LCC_A \approx 5,0 + \frac{0,8}{(1,06)^{25}} = Rp\ 5,3\ M$$

Skenario B – Patch Repair Konvensional

Parameter	Nilai
Biaya awal	Rp. 1.500.000/m ²
Total C_0	Rp. 1,5 M
Umur layanan	10 tahun
Repair ulang	Tahun 10, 20, 30, 40

$$LCC_B = \sum_{k=0}^4 \frac{1,5}{(1,06)^{10k}}$$

$$LCC_B \approx Rp. 3,8 M$$

Skenario C -Repair Berbasis Durabilitas (ECC / CP)

Parameter	Nilai
Biaya awal	Rp. 2.500.000/m ²
Total C ₀	Rp. 2,5 M
Umur layanan	30-40 tahun
Repair tambahan	Minor tahun ke-30

$$LCC_C = 2,5 + \frac{0,5}{(1,06)^{30}}$$

$$LCC_C \approx Rp. 2,8 M$$

12.4 Ringkasan Life Cycle Cost

Skenario	LCC (Rp M)	Relatif
Rekonstruksi	5,3	100 %
Patch repair	3,8	72 %
Repair durabilitas	2,8	53 %

Repair berbasis durabilitas = penghematan LCC ± 47%

12.5 Model Kuantitatif Emisi CO₂

12.5.1 Faktor Emisi (Rata-rata Global)

Material	Faktor CO ₂
Semen Portland	0,85 t CO ₂ /ton
Beton normal	300 kg CO ₂ / m ³
ECC / Low-carbon repair	120-180 kg CO ₂ / m ³
Rekonstruksi	100% baselie

12.6 Contoh Hitung CO₂ Saving

Skenario A – Rekonstruksi

- Volume beton = 300 m³

Faktor Rekonstruksi = 0,30 t/m³

$$\text{CO}_2 \text{ A} = 300 \text{ m}^3 \times 0,30 \text{ t/m}^3 = 90 \text{ ton}$$

Skenario B – Patch Repair Konvensional

- Volume repair total (50 th) = 200 m³

Faktor Patch Repair Konvensional = 0,30 t/m³

$$\text{CO}_2 \text{ B} = 200 \text{ m}^3 \times 0,30 \text{ t/m}^3 = 60 \text{ ton}$$

Skenario C – ECC / Durability Repair

- Volume repair = 120 m³
- Faktor ECC = 0,15 t/m³

$$\text{CO}_2 \text{ C} = 120 \text{ m}^3 \times 0,15 \text{ t/m}^3 = 18 \text{ ton}$$

12.7 Ringkasan CO₂ Saving

Skenario	CO ₂ (ton)	Pengurangan
Rekonstruksi	90	-
Patch repair	60	33%
Repair durabilitas	18	80%

Repair berbasis durabilitas = pengurangan CO₂ hingga 80%

12.8 Indeks Efisiensi Terpadu (Cost-Carbon Index)

$$CCI = \frac{LCC}{CO_2} \tag{12-2}$$

Skenario	CCI (Rp juta/ton CO ₂)
Rekonstruksi	59
Patch repair	63
Repair durabilitas	156

Nilai lebih tinggi = lebih efisien & berkelanjutan

BAB 13

MANAJEMEN RISIKO DAN KEANDALAN DALAM REPAIR BETON

Dalam praktik rekayasa struktur beton modern, kerusakan material dan kebutuhan untuk melakukan *repair* bukan sekadar respons terhadap gejala visual, melainkan hasil dari proses degradasi yang kompleks dan tidak pasti. Pendekatan tradisional yang deterministik kini ditantang oleh pendekatan probabilistik yang mempertimbangkan variabilitas parameter material, lingkungan paparan, dan ketidakakuratan data inspeksi (Val et al., 2025).

13.1 Konsep Risiko dan Reliability pada Struktur Beton

Konsep risiko dan reliability pada struktur beton didasarkan pada pendekatan probabilistik yang mempertimbangkan variabilitas sifat material, ketidakpastian beban, serta proses deteriorasi waktu-ke-waktu. Dalam kerangka modern, keamanan struktur tidak lagi dipandang sebagai kondisi deterministik (aman/tidak aman), tetapi sebagai probabilitas kegagalan yang dapat dihitung secara kuantitatif melalui analisis keandalan (*structural reliability analysis*).

1. Definisi Reliability dan Probabilitas Kegagalan

Reliability didefinisikan sebagai probabilitas bahwa kapasitas struktur R melebihi beban atau demand S selama periode tertentu:

$$R(t) > S(t) \quad (13-1)$$

Fungsi batas (*limit state function*) dinyatakan sebagai:

$$g(X, t) = R(X, t) - S(X, t) \quad (13-2)$$

Kegagalan terjadi jika $g(X, t) \leq 0$.

Probabilitas kegagalan dihitung sebagai:

$$P_f(t) = P[g(X, t) \leq 0] \quad (13-3)$$

Indeks keandalan β didefinisikan sebagai:

$$\beta(t) = -\phi^{-1}(P_f(t)) \quad (13-4)$$

Dimana ϕ^{-1} adalah inverse fungsi distribusi normal standar.

Pendekatan ini tetap menjadi dasar analisis reliability modern sebagaimana dikembangkan dalam studi terbaru pada struktur beton yang mengalami deteriorasi akibat klorida dan korosi (Liu et al., 2024; Kim & Frangopol, 2024).

2. Reliability Waktu-ke-Waktu (Time-Dependent Reliability)

Pada struktur beton, kapasitas $R(t)$ menurun akibat:

- Korosi tulangan
- Retak dan spalling
- Penurunan modulus elastisitas
- Fatigue dan beban siklik

Time-dependent reliability mempertimbangkan perubahan parameter statistik kapasitas dan beban terhadap waktu:

$$\beta(t) = \frac{\mu_R(t) - \mu_S(t)}{\sqrt{\sigma_R^2(t) + \sigma_S^2(t)}} \quad (13-5)$$

Liu et al. (2024) menunjukkan bahwa pada struktur pesisir tanpa intervensi, indeks keandalan dapat turun dari $\beta \approx 4.0$ menjadi <3.0 dalam rentang 20-30 tahun akibat penetrasi klorida.

Penelitian Nguyen et al. (2025) menegaskan bahwa pendekatan reliability dinamis yang diperbarui berbasis monitoring menghasilkan estimasi P_f yang lebih realistis dibanding pendekatan statis berbasis parameter awal desain.

3. Konsep Risiko pada Struktur Beton

Risiko didefinisikan sebagai kombinasi probabilitas kegagalan dan konsekuensi kegagalan:

$$Risk(t) = P_f t \times C_f \quad (13-6)$$

Dimana C_f mencakup:

- Biaya langsung perbaikan
- Kerugian ekonomi akibat gangguan layanan
- Dampak sosial dan keselamatan
- Dampak lingkungan

Lee et al. (2024) menunjukkan bahwa pada infrastruktur perkotaan, komponen biaya tidak langsung dapat mencapai 40-70% dari total konsekuensi kegagalan, sehingga pengabaian faktor ini menyebabkan underestimation risiko yang signifikan.

4. Target Reliability dan Kategori Struktur

Dalam pendekatan modern berbasis risiko, nilai target reliability (β_{target}) ditentukan berdasarkan tingkat konsekuensi kegagalan dan kategori struktur. Studi Zhang et al. (2003) menunjukkan bahwa struktur dengan konsekuensi tinggi (misalnya jembatan utama atau pelabuhan strategis) memerlukan $\beta_{target} \geq 3.5$, sedangkan struktur dengan konsekuensi sedang dapat menggunakan $\beta_{target} \approx 3.0$.

Pendekatan ini selaras dengan framework reliability-based design dan performance-based maintenance yang dikembangkan dalam literatur Q1 terbaru.

5. Integrasi Reliability dan Manajemen Aset

Konsep reliability tidak berdiri sendiri, tetapi terintegrasi dengan:

- Probabilistic deterioration modeling
- Risk-based inspection
- Life-cycle cost optimization
- Digital twin updating

Kim dan Frangopol (2024) menunjukkan bahwa penerapan *reliability-based maintenance planning* mampu menurunkan biaya siklus hidup hingga 15–22% dibanding pendekatan deterministik interval tetap.

6. Sintesis Akademik

Secara konseptual, pendekatan risiko dan reliability pada struktur beton modern (2023–2025) ditandai oleh:

1. Penggunaan model probabilistik *time-dependent*
2. Integrasi *Bayesian updating* berbasis data monitoring
3. Penetapan target reliability berbasis konsekuensi
4. Optimasi keputusan berbasis *life-cycle cost* dan risiko

Pendekatan ini menggantikan paradigma klasik berbasis faktor keamanan tunggal menuju sistem evaluasi kinerja berbasis probabilitas dan risiko yang terukur secara kuantitatif.

13.2 Probabilistic Deterioration Modeling

Model deteriorasi probabilistik digunakan untuk memprediksi evolusi kerusakan struktur beton berbasis variabel acak dan ketidakpastian parameter material maupun lingkungan. Dalam konteks lingkungan laut dan paparan klorida, model difusi klorida berbasis hukum Fick tetap menjadi fondasi, namun kini dikembangkan dalam kerangka stokastik dengan koefisien difusivitas sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi lognormal atau gamma (Zhang et al., 2025; Li & Stewart, 2024).

Pemodelan probabilistik kerusakan beton membantu memprediksi bagaimana performa struktur berubah terhadap waktu, termasuk variabilitas fase awal degradasi sampai masa kegagalan. Val et al. (2025) memberikan *state-of-the-art* pemodelan stokastik berbagai mekanisme degradasi—termasuk korosi tulangan, freeze-thaw cycles, alkali-aggregate reaction, dan fatigue—dengan ilustrasi implikasi strukturalnya berdasarkan data inspeksi dan monitoring yang terakumulasi.

Model seperti ini sangat penting untuk mengestimasi Remaining Service Life (RSL) beton—yakni lamanya struktur dapat bertahan sampai perbaikan berikutnya diperlukan—dengan mempertimbangkan varians parameter lapangan. Temuan terbaru menunjukkan bahwa model probabilistik secara signifikan memperbaiki akurasi prediksi dibanding pendekatan deterministik tradisional.

Degradasi beton bertulang akibat korosi dapat dimodelkan dalam dua fase:

(1) Fase Inisiasi Korosi

Waktu inisiasi korosi t , akibat penetrasi klorida dapat dihitung menggunakan solusi Fick's Second Law;

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{eff}t}} \right) \right] \quad (13-7)$$

Korosi mulai ketika:

$$C(x = \text{cover}, t_i) = C_{crit} \quad (13-8)$$

Parameter D_{eff} , C_s dan C_{crit} diperlakukan sebagai variabel acak dengan distribusi lognormal atau normal.

(2) Fase

Penurunan luas tulangan akibat korosi dapat dimodelkan:

$$A_s = A_{s0} - \pi d_0 k_{corr} (t - t_i) \quad (13-9)$$

Dimana:

- k_{corr} = laju korosi (mm/tahun)
- d_0 = diameter awal tulangan

Dengan pendekatan Monte Carlo Simulation (MCS), distribusi probabilitas kapasitas lentur atau geser struktur dapat diperoleh sebagai fungsi waktu.

13.3 Reliability-Based Repair Planning

Reliability-Based Repair Planning (RBRP) mengintegrasikan analisis probabilitas kegagalan dengan strategi waktu intervensi berbasis risiko dan kinerja. Prinsip dasarnya adalah menetapkan waktu repair ketika indeks keandalan struktur $\beta(t)$ turun di bawah target reliability β_{target} yang ditentukan berdasarkan kategori konsekuensi dan eksposur lingkungan.

Pendekatan mutakhir menunjukkan bahwa target reliability untuk struktur beton infrastruktur publik umumnya berada pada rentang:

Pendekatan mutakhir menunjukkan bahwa target reliability untuk struktur beton infrastruktur publik umumnya berada pada rentang:

$$\beta_{target} = 3.1 - 4.2$$

Yang ekuivalen dengan probabilitas kegagalan tahunan:

$$P_f = 10^{-3} - 10^{-5}$$

Bergantung pada kategori konsekuensi dan eksposur lingkungan (Zhang et al., 2003; Bastidas-Arteaga & Schoefs, 2004).

Indeks keandalan didefinisikan sebagai:

$$\beta = \frac{\mu R - \mu S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (13-10)$$

Dimana:

- R = kapasitas struktur (resistance)
- S = efek beban (load effect)
- μ dan σ = nilai rata-rata dan simpangan baku

Dalam struktur beton terpapar klorida, kapasitas $R(t)$ menurun akibat reduksi luas penampang tulangan:

$$R(t) = R_o \left(1 - \frac{\Delta A_s(t)}{A_{s0}} \right) \quad (13-11)$$

Dengan laju korosi:

$$\Delta A_s(t) = k \cdot i_{corr} \cdot t \quad (13-12)$$

Seiring waktu, $\beta(t)$ mengalami degradasi non-linier. Waktu repair optimal t^* ditentukan ketika:

$$\beta(t^*) = \beta_{target} \quad (13-13)$$

Optimasi Waktu Intervensi

Fungsi biaya total siklus hidup berbasis reliability:

$$LCC(t) = C_0 + C_m(t) + P_f(t) \cdot C_f \quad (13-14)$$

Dimana:

- C_0 = biaya awal
- C_m = biaya maintenance/repair
- C_f = konsekuensi kegagalan
- $P_f(t) = \phi(-\beta(t))$

Titik optimum dicapai ketika turunan pertama terhadap waktu sama dengan nol:

$$\frac{d}{dt} LCC(t) = 0 \quad (13-15)$$

Penelitian Q1 terbaru menunjukkan bahwa pendekatan reliability-based maintenance mampu:

- Mengurangi LCC 15-30% dibanding interval tetap
- Mengurangi perobabilitas kegagalan kumulatif hingga 1-2 orde magnitudo
- Mengoptimalkan interval repair 20-40% lebih panjang dibanding metode determanistik

(Bastidas-Arteaga & Schoes, 2024; Li et al., 2025).

Integrasi dengan Digital Monitoring

Dengan sistem monitoring berbasis sensor:

$$\beta_{updated} = f(Data_{real} - time) \quad (13-16)$$

Pendekatan ini memungkinkan:

- Updating reliability tahunan
- Penurunan ketidakpastian parameter hingga 30-50%
- Penjadwalan repair adaptif berbasis risiko aktual

13.4 Analisis Ketidakpastian dalam Desain Repair

Analisis ketidakpastian dalam desain repair beton bertujuan untuk mengkuantifikasi variabilitas parameter material, geometri, beban, dan degradasi sehingga keputusan intervensi tidak berbasis nilai deterministik tunggal, tetapi pada distribusi probabilistik.

$$g(X) \leq 0 \quad (13-17)$$

Probabilitas kegagalan:

$$P_f = P[g(X) \leq 0] \quad (13-18)$$

Sumber Ketidakpastian dalam Repair Beton

Ketidakpastian dalam desain repair berasal dari:

1. Variabilitas kuat tekan beton (COV 10-20%)
2. Variabilitas laju korosi i_{corr} (COV 20-40%)

3. Ketebalan selimut beton (deviasi 5–10 mm)
4. Model error faktor (bias model)

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa ketidakpastian model degradasi dapat menyumbang hingga 30% dari total varians kapasitas residual struktur (Nguyen et al., 2025).

Propagasi ketidakpastian dapat dihitung melalui:

$$Var[g(X)] = \sum \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 Var[X_i] \quad (13-19)$$

Atau melalui simulasi Monte Carlo:

$$P_f \approx \frac{n_{failure}}{N} \quad (13-20)$$

Dengan $N \geq 10^4$ untuk konvergensi stabil (Zhang et al., 2025).

Model Bayesian Updating dalam Desain Repair

Dalam pendekatan mutakhir, parameter degradasi diperbarui menggunakan data inspeksi aktual:

$$f(\theta|Data) = \frac{f(Data|\theta) f(\theta)}{f(Data)} \quad (13-21)$$

Pendekatan Bayesian updating terbukti mampu menurunkan ketidakpastian parameter difusi klorida hingga 30–50% setelah integrasi data monitoring.

Dengan updating ini, reliability index dapat ditingkatkan tanpa intervensi struktural besar, karena estimasi kapasitas menjadi lebih akurat.

Pengaruh Ketidakpastian terhadap Desain Repair

Jika desain repair dilakukan tanpa mempertimbangkan ketidakpastian:

$$\beta_{deterministic} > \beta_{actual} \quad (13-22)$$

Yang berarti risiko kegagalan lebih tinggi dari yang diperkirakan.

Simulasi reliability-based repair menunjukkan bahwa:

- Mengabaikan variabilitas difusivitas dapat meng-underestimate P_f hingga 1 orde magnitudo
- Desain berbasis nilai rata-rata saja dapat meningkatkan risiko kegagalan 2-3 kali

Optimasi Desain Repair Berbasis Ketidakpastian

Fungsi optimasi:

$$\min C_{repair} \quad (13-23)$$

dengan kendala:

$$\beta(t) \geq \beta_{target} \quad (13-24)$$

Dan

$$P_f \leq P_{acceptable} \quad (13-25)$$

Analisis menunjukkan bahwa integrasi uncertainty modeling dalam desain repair:

- ✓ Mengurangi overdesign 10-20%
- ✓ Mengurangi underdesign risiko tinggi
- ✓ Mengoptimalkan interval repair 15-30%

13.5 Risk-Based Inspection (RBI) dan Prioritisasi Repair

Risk-Based Inspection (RBI) merupakan pendekatan manajemen infrastruktur berbasis kuantifikasi risiko, di mana prioritas inspeksi dan repair ditentukan berdasarkan kombinasi **probabilitas kegagalan (Probability of Failure, P_f)** dan **konsekuensi kegagalan (Consequence of Failure, CoF)**. Secara matematis, risiko didefinisikan sebagai:

$$R = P_f \times C_f \quad (13-26)$$

dengan P_f diperoleh melalui analisis keandalan atau model deteriorasi probabilistik, dan C_f dihitung berdasarkan dampak ekonomi, sosial, keselamatan, dan lingkungan.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi RBI dengan model deteriorasi berbasis data lapangan dan machine learning meningkatkan akurasi estimasi risiko hingga 15–30% dibanding pendekatan deterministik tradisional (Zhang et al., 2025; Kim & Frangopol, 2024). Studi oleh Nguyen et al. (2025) pada struktur beton jembatan pesisir menunjukkan bahwa penggunaan Bayesian updating dalam RBI mampu menurunkan ketidakpastian estimasi P_f sebesar $\pm 20\%$ setelah dua siklus inspeksi periodik.

Dalam konteks repair beton, pendekatan RBI memungkinkan klasifikasi elemen struktur ke dalam beberapa kategori risiko, misalnya:

Kategori Risiko	Pf (per tahun)	Konsekuensi	Tindakan
Rendah	$< 10^{-4}$	Minor	Monitoring rutin
Sedang	$10^{-4} - 10^{-3}$	Moderat	Preventive repair
Tinggi	$> 10^{-3}$	Signifikan	Immediate repair / strengthening

Pendekatan ini memungkinkan optimasi alokasi anggaran pemeliharaan. Analisis numerik menunjukkan bahwa penerapan RBI pada jaringan jembatan beton skala nasional dapat mengurangi total biaya siklus hidup (Life-Cycle Cost, LCC) sebesar 10–25% dalam horizon 30–50 tahun dibanding inspeksi berbasis interval tetap (Frangopol & Soliman, 2023; Lee et al., 2024).

Lebih lanjut, integrasi RBI dengan sistem manajemen aset digital (Digital Twin) memungkinkan pembaruan risiko secara real-time berdasarkan data sensor korosi, kelembaban, dan retak. Studi terbaru melaporkan bahwa pendekatan ini meningkatkan keandalan prediksi remaining service life hingga $R^2 > 0.85$ pada struktur beton laut (Wang et al., 2025).

13.6 Model Keputusan Repair Berbasis Risiko dan Konsekuensi Kegagalan

Model keputusan repair berbasis risiko (risk- and consequence-based repair decision model) mengintegrasikan **probabilitas kegagalan (Pf)**, **konsekuensi kegagalan (Cf)**, serta **biaya intervensi (Ci)** ke dalam satu kerangka optimasi keputusan. Secara umum, fungsi objektif dinyatakan sebagai minimisasi **Expected Total Cost (ETC)** selama umur layanan:

$$\text{Min } E[C_{total}] = C_i(t) + P_f(t) \times C_f + C_{maintenance}(t) \quad (13-27)$$

Dimana:

- $C_i(t)$ = biaya repair pada waktu t
- $P_f(t)$ = probabilitas kegagalan pada waktu t
- C_f = konsekuensi kegagalan (ekonomi, sosial, lingkungan)
- $C_{maintenance}(t)$ = biaya pemeliharaan berkelanjutan

Pendekatan ini dikembangkan lebih lanjut dalam literatur Q1 terbaru dengan integrasi **life-cycle reliability analysis**, **bayesian updating**, dan **multi-objective optimization** (Zhang et al., 2025; Kim & Frangopol, 2024; Nguyen et al., 2025). Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa keputusan repair optimal terjadi pada titik ketika marginal increase risiko lebih besar dari pada marginal cost intervensi.

1. Formulasi Kuantitatif Risiko dan Konsekuensi

Risiko tahunan dihitung sebagai:

$$R(t) = P_f(t) \times C_f \quad (13-28)$$

Konsekuensi kegagalan (C_f) tidak hanya mencakup biaya langsung perbaikan ulang, tetapi juga:

- Kerugian ekonomi akibat downtime
- Biaya sosial (misal korban atau gangguan layanan publik)
- Dampak lingkungan

Penelitian oleh Lee et al. (2024) menunjukkan bahwa pada jembatan beton perkotaan, komponen **indirect cost** dapat mencapai 40-70% dari total konsekuensi kegagalan, sehingga pengabaian faktor ini menyebabkan underestimation risiko hingga 30%.

2. Model Optimasi Waktu Repair

Waktu repair optimal t^* diperoleh dengan meminimalkan:

$$\frac{d}{dt} [C_i(t) + P_f(t) \times C_f] = 0 \quad (13-29)$$

Dalam aplikasi pada struktur beton lingkungan laur, Wang et al. (2025) menunjukkan bahwa intervensi yang dilakukan pada saat indeks keandalan turun ke $\beta \approx 3.0-3.2$ menghasilkan penghematan biaya siklus hidup sebesar 15-22% dibanding pendekatan interval tetap.

Model berbasis Markov Decision Process (MDP) dan stochastic dynamic programming yang dikembangkan dalam studi Q1 terbaru juga memungkinkan simulasi berbagai skenario intervensi (patch repair, cathodic protection, strengthening) dengan mempertimbangkan transisi kondisi struktur secara probabilistik (Nguyen et al., 2025).

3. Integrasi Multi-Objective Decision Making

Model modern tidak hanya meminimalkan biaya, tetapi juga mempertimbangkan:

- Target reliability (β_{target})
- Batas risiko tahunan (R_{target})
- Batas emisi karbon (carbon footprint constraint)

Zheng et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi reliability-sustainability dalam model keputusan repair mampu menurunkan cumulative carbon emission hingga 12-18% tanpa meningkatkan P_f secara signifikan.

13.7 Integrasi Risk Assessment dengan Digital Twin

Integrasi *risk assessment* dengan **Digital Twin (DT)** merepresentasikan evolusi terbaru dalam manajemen infrastruktur

beton berbasis probabilistik. Digital Twin didefinisikan sebagai representasi virtual dinamis dari struktur fisik yang diperbarui secara kontinu melalui data sensor, inspeksi, dan model numerik. Dalam konteks risk-based repair, DT memungkinkan pembaruan real-time terhadap probabilitas kegagalan $P_f(t)$, indeks keandalan $\beta(t)$, serta estimasi sisa umur layan (*remaining service life, RSL*).

Penelitian Q1 terbaru menunjukkan bahwa integrasi DT dengan model deteriorasi stokastik secara signifikan meningkatkan akurasi prediksi kinerja struktur. Wang et al. (2025) melaporkan bahwa penerapan DT pada struktur beton laut dengan sensor korosi dan kelembaban mampu meningkatkan koefisien determinasi prediksi RSL hingga $R^2 > 0.85$, dibanding model statis konvensional ($R^2 \approx 0.60-0.70$). Hal ini menunjukkan reduksi ketidakpastian model hingga 25-35%.

1. Framework Kuantitatif Integrasi Risk-Digital Twin

Secara matematis, pembaruan risiko dalam DT dilakukan melalui pendekatan Bayesian updating:

$$P_f(t|D) = \frac{P(D|P_f(t)) \cdot P_f(t)}{P(D)} \quad (13-30)$$

Dimana:

- D = data observasi sensor/inspeksi
- $P_f(t)$ = probabilitas kegagalan prior
- $P_f(t|D)$ = probabilitas kegagalan posterior

Nguyen et al. (2025) menunjukkan bahwa setelah dua siklus pembaruan berbasis data lapangan, variansi estimasi P_f dapat

berkurang hingga $\pm 20\%$, sehingga keputusan repair menjadi lebih presisi secara ekonomi dan teknis.

2. Digital Twin dan Reliability Updating

Dalam kerangka reliability-based design, indeks keandalan dihitung sebagai:

$$\beta(t) = \frac{\mu_R(t) - \mu_S(t)}{\sqrt{\sigma_R^2(t) + \sigma_S^2(t)}} \quad (13-31)$$

Dengan:

- $R(t)$ = kapasitas struktur waktu-ke-waktu
- $S(t)$ = beban atau demand
- μ dan σ = nilai rata-rata dan deviasi standar

Zhang et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi data sensor retak dan korosi ke dalam DT memungkinkan pembaruan parameter μ_R dan σ_S secara dinamis, menghasilkan estimasi β yang lebih realistis dibanding pendekatan deterministik berbasis inspeksi periodik.

3. Optimasi Repair Berbasis Digital Twin

Integrasi DT dengan model keputusan repair (Subbab 13.6) memungkinkan optimasi waktu intervensi berbasis risiko aktual, bukan prediksi statis. Kim dan Frangopol (2024) menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat menurunkan total biaya siklus hidup sebesar 15–22% pada jaringan jembatan beton ketika dibandingkan dengan strategi berbasis interval tetap.

Selain itu, Lee et al. (2024) menegaskan bahwa integrasi DT dengan multi-objective optimization memungkinkan pengambilan keputusan yang mempertimbangkan:

- Target reliability (β_{target})
- Batas risiko tahunan
- Biaya siklus hidup (LCC)
- Emisi karbon kumulatif

Dalam studi tersebut, strategi berbasis DT mampu menurunkan risiko kegagalan tahunan hingga 30% tanpa peningkatan signifikan pada total anggaran pemeliharaan.

4. Implementasi pada Infrastruktur Laut

Pada struktur beton di lingkungan laut, sensor klorida, potensial korosi, dan kelembaban internal menjadi input utama DT. Wang et al. (2025) menunjukkan bahwa sistem DT pada dermaga beton bertulang memungkinkan deteksi dini inisiasi korosi 3-5 tahun lebih cepat dibanding metode inspeksi visual konvensional, sehingga intervensi dapat dilakukan sebelum β turun di bawah 3.0 (batas umum untuk struktur publik).

13.8 Studi Numerik: Optimasi Waktu Repair

Studi numerik optimasi waktu repair bertujuan menentukan waktu intervensi t^* yang meminimalkan **expected life-cycle cost (ELCC)** dengan tetap memenuhi batas target keandalan β_{target} . Pendekatan ini mengintegrasikan model deteriorasi probabilistik, analisis keandalan waktu-ke-waktu, serta optimasi berbasis risiko sebagaimana dikembangkan dalam literatur Q1 terbaru (Kim & Frangopol, 2024; Lee et al., 2024; Nguyen et al., 2025).

1. Formulasi Model Deteriorasi dan Keandalan

Untuk struktur beton bertulang di lingkungan laut, penetrasi klorida dimodelkan sebagai proses difusi stokastik dengan

koefisien difusi D sebagai variabel acak lognormal. Waktu inisiasi korosi T_i diperoleh dari solusi probabilistik persamaan difusi dan dihitung melalui simulasi Monte Carlo (Liu et al., 2024).

Setelah korosi terinisiasi, penurunan luas tulangan $A_s(t)$ mengikuti model kehilangan penampang:

$$A_s(t) = A_{s0} - \alpha(t - T_i) \quad (13-32)$$

di mana α adalah laju korosi rata-rata (mm^2/tahun).

Indeks keandalan dihitung sebagai:

$$\beta(t) = \frac{\mu_R(t) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(t) + \sigma_S^2}} \quad (13-33)$$

Dengan kapasitas lentur $R(t)$ menurun seiring berkurangnya luas tulangan. Studi Liu et al. (2024) menunjukkan bahwa tanpa intervensi, β pada struktur pesisir dapat turun dari 4.0 menjadi < 3.0 dalam 25-30 tahun.

2. Formulasi Fungsi Objektif Optimasi

Fungsi objektif yang diminimalkan adalah:

$$E[C_{total}(t)] = C_r(t) + P_f(t) \cdot C_f \quad (13-34)$$

Dimana:

- $C_r(t)$ = biaya repair pada waktu t
- $P_f(t)$ = probabilitas kegagalan
- C_f = konsekuensi kegagalan

Kim dan Frangopol (2024) menunjukkan bahwa pendekatan reliability-based optimization menghasilkan penghematan biaya siklus hidup sebesar 15-22% dibanding strategi interval tetap.

3. Simulasi Numerik (Ilustratif)

Asumsi parameter:

- $\beta_0 = 4.0$ (awal)
- $\beta_{\text{target}} = 3.0$
- $C_f = 10 \times$ biaya repair awal
- Horizon analisis = 50 tahun
- Diskonto = 3%

Hasil simulasi Monte Carlo (10.000 iterasi):

Waktu Repair (tahun)	β saat repair	ELCC (relatif)
15	3.6	1.18
20	3.2	1.00 (optimum)
25	2.8	1.25
30	2.5	1.60

Repair pada tahun ke-20 memberikan biaya total minimum sekaligus menjaga $\beta \geq 3.0$. Jika repair ditunda hingga $\beta < 3.0$, risiko kegagalan meningkat eksponensial sehingga ELCC melonjak 25-60%.

Hasil ini konsisten dengan temuan Lee et al. (2024) bahwa waktu intervensi optimal umumnya terjadi sebelum indeks keandalan turun 10-15% di bawah target desain.

4. Integrasi dengan Digital Twin dan Updating Dinamis

Dengan integrasi Digital Twin, parameter deteriorasi diperbarui berbasis data sensor. Nguyen et al. (2025) menunjukkan bahwa updating Bayesian dapat menggeser waktu optimum repair hingga $\pm 3-5$ tahun dibanding estimasi awal, tergantung pada hasil monitoring aktual.

Pendekatan ini mengurangi ketidakpastian keputusan dan menurunkan risiko under- atau over-maintenance hingga 20–30%.

5. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk memahami sejauh mana perubahan pada parameter kunci dapat mempengaruhi waktu optimal pelaksanaan repair dalam kerangka pengambilan keputusan berbasis risiko dan biaya siklus hidup. Dalam konteks manajemen infrastruktur beton, banyak parameter yang bersifat tidak pasti, seperti laju korosi tulangan, konsekuensi kegagalan struktur, serta tingkat diskonto ekonomi yang digunakan dalam analisis biaya jangka panjang. Oleh karena itu, analisis sensitivitas menjadi alat penting untuk mengidentifikasi parameter mana yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap keputusan strategi repair.

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan laju korosi sebesar 20% dapat mempercepat waktu optimal pelaksanaan repair sekitar 4–6 tahun lebih awal dibandingkan dengan skenario dasar. Hal ini terjadi karena peningkatan laju korosi akan mempercepat degradasi penampang tulangan serta memperpendek waktu menuju kondisi batas kegagalan. Dengan demikian, jika parameter korosi tidak dikendalikan atau meningkat akibat perubahan lingkungan, maka penundaan tindakan repair dapat menyebabkan peningkatan risiko kerusakan struktural yang lebih serius serta biaya rehabilitasi yang lebih besar di masa depan.

Selain laju korosi, faktor konsekuensi kegagalan struktur juga menunjukkan pengaruh yang sangat signifikan terhadap waktu keputusan repair. Dalam skenario di mana nilai konsekuensi kegagalan meningkat sebesar 50%, model optimasi menunjukkan bahwa tindakan repair sebaiknya dilakukan sekitar 3–4 tahun lebih awal dibandingkan kondisi dasar. Hal ini mencerminkan prinsip dasar manajemen risiko, yaitu bahwa struktur dengan potensi dampak kegagalan yang tinggi—misalnya jembatan utama, pelabuhan, atau fasilitas industri penting—memerlukan pendekatan pemeliharaan yang lebih konservatif untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya kegagalan yang berdampak besar.

Analisis sensitivitas juga menunjukkan pengaruh parameter ekonomi, khususnya tingkat diskonto, terhadap keputusan waktu repair. Ketika nilai diskonto melebihi 5%, model cenderung merekomendasikan penundaan tindakan repair karena nilai biaya masa depan menjadi relatif lebih kecil dalam perhitungan nilai sekarang. Meskipun secara ekonomi pendekatan ini dapat terlihat lebih menguntungkan dalam jangka pendek, penundaan repair juga berpotensi meningkatkan risiko kerusakan struktural serta biaya rehabilitasi yang lebih besar apabila degradasi telah berkembang secara signifikan.

Temuan ini menunjukkan bahwa keputusan strategi repair tidak hanya dipengaruhi oleh faktor teknis, tetapi juga oleh pertimbangan ekonomi dan tingkat risiko kegagalan. Oleh karena itu, pendekatan yang mengintegrasikan parameter teknis dan ekonomi menjadi sangat penting dalam perencanaan pemeliharaan infrastruktur.

BAB 14

EKONOMI TEKNIK, LIFE CYCLE COST ANALYSIS (LCCA), DAN STRATEGI PEMBIAYAAN REPAIR

Bab 14 mengulas secara mendalam bagaimana aspek ekonomi, biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost Analysis – LCCA*), serta keputusan ekonomi-manajerial diterapkan dalam konteks teknologi *repair* beton. Fokus utamanya adalah bagaimana pendekatan *ekonomi teknik* dan pemodelan biaya jangka panjang mendukung keputusan desain, operasional, pemeliharaan, dan strategi pembiayaan yang optimal untuk struktur beton, terutama yang mengalami degradasi atau korosi.

Agar dapat membuat keputusan yang baik dalam konteks investasi perbaikan dan pemeliharaan beton, perlu dipahami bahwa biaya total suatu proyek tidak hanya mencakup biaya awal saja, tetapi juga biaya perawatan, perbaikan, dampak sosial, dan lingkungan sepanjang umur layanan struktur (LCCA sebagai studi multidimensi). Hal ini sejalan dengan pandangan Life Cycle Cost Analysis yang melihat biaya total sebagai penjumlahan *all future costs* dari *cradle to grave* (LCCA) dari suatu sistem/komponen infrastruktur.

14.1 Prinsip Ekonomi Teknik dalam Infrastruktur Beton

Ekonomi teknik merupakan disiplin yang menganalisis keputusan investasi berdasarkan nilai waktu dari uang (*time value of money*), risiko, dan manfaat jangka panjang. Dalam konteks struktur beton, konsep seperti *discount rate*, nilai sekarang bersih (*Net Present Value – NPV*), dan *internal rate of return (IRR)* menjadi dasar untuk mengevaluasi opsi perbaikan versus penggantian. Secara matematis, total biaya siklus hidup (LCC) dapat dinyatakan sebagai:

$$LCC = C_{initial} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{operation}(t) + C_{maintenance}(t) + C_{repair}(t) + C_{end}(t)}{(1+r)^t} \quad (14-1)$$

Dengan:

- $C_{initial}$ = biaya konstruksi awal
- $C_{operation}(t)$ = biaya operasional tahunan
- $C_{maintenance}(t)$ = biaya pemeliharaan rutin
- $C_{repair}(t)$ = biaya perbaikan atau rehabilitasi
- $C_{end}(t)$ = biaya akhir masa pakai (demolisi/recycle)
- r = tingkat diskonto
- T = umur rencana struktur

Pendekatan ini memaksa perencana untuk menghitung biaya total jangka panjang, bukan hanya biaya awal.

Ekonomi teknik dalam repair beton bertujuan meminimalkan **total biaya siklus hidup (total life-cycle cost, TLCC)** dengan tetap memenuhi target kinerja struktural dan tingkat keandalan minimum ($\beta \geq 3.1-3.8$ untuk struktur eksisting tergantung kategori konsekuensi kegagalan).

Keputusan repair didasarkan pada konsep nilai waktu uang (time value of money). Nilai kono bersih (Net Present Value, NPV) dirumuskan sebagai:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (14-2)$$

Dimana:

- C_t = biaya pada tahun ke- t
- r = tingkat diskonto riil
- n = horizon analisis (tahun)

Untuk infrastruktur beton, horizon analisis umumnya 30-50 tahun, dengan tingkat diskonto sosial 3-6%.

Keputusan optimal adalah alternatif dengan **NPV terendah atau Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC) minimum**:

$$EUAC = NPV \cdot \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (14-3)$$

14.2 Life Cycle Cost Analysis (LCCA) pada Repair Beton

LCCA adalah alat analitik yang digunakan untuk mengevaluasi biaya sepanjang siklus hidup aset beton, termasuk biaya perbaikan, pemeliharaan, dan penggantian komponen. Dalam studi beton, LCCA tidak hanya mempertimbangkan *direct costs*, tetapi juga biaya *indirect*, seperti gangguan layanan, biaya pengguna (user costs), dan dampak yang terkait dengan inspeksi dan downtime. Pendekatan LCCA terhadap *repair* beton dapat membantu memprediksi *break-even point* antara pilihan perbaikan versus penggantian total struktur.

Selain itu, penelitian terbaru mengenai beton bertulang menunjukkan bahwa integrasi LCCA dengan *Life Cycle Assessment (LCA)* memberikan gambaran yang lebih utuh tentang *sustainability* teknik reparasi: baik dari sisi biaya maupun dampak lingkungan secara bersamaan. Studi literatur menyimpulkan bahwa LCCA, meskipun masih kurang dipakai secara luas dalam pemilihan strategi *repair*, sangat penting untuk keputusan jangka panjang.

Total biaya siklus hidup repair dapat dinyatakan sebagai:

$$LCC = C_{init} + C_{maint} + C_{repair} + C_{downtime} + C_{failure} - V_{residual} \quad (14-4)$$

Komponen biaya meliputi:

1. Biaya awal repair (C_{init})
Rp 1-3 juta/m² untuk patch repair struktural (kisaran tipikal Asia Tenggara)
2. Biaya pemeliharaan berkala (C_{maint})
1-2% dari biaya awal per tahun
3. Biaya downtime ($C_{downtime}$)
Pada jembatan perkotaan dapat mencapai Rp 50-200 juta/hari akibat gangguan lalu lintas
4. Biaya kegagalan ($C_{failure}$)
Dirumuskan sebagai:

$$C_{failure} = P_f \times C_{consequence}$$

Dengan $P_f = \Phi(-\beta)$
 Sebagai ilustrasi kuantitatif:
 Jika $\beta = 3.5 \rightarrow P_f \approx 2.3 \times 10^{-4}$
 Jika konsekuensi kegagalan Rp 100 miliar $\rightarrow$ Expected failure cost = Rp 46 juta

14.3 Analisis Cost-Benefit: Repair vs Strengthening vs Replacement

Analisis *cost-benefit* (CBA) menilai apakah manfaat dari suatu tindakan (misalnya memperbaiki atau memperkuat struktur) melebihi biayanya. Secara umum, *repair* akan lebih menguntungkan jika

$$NPV_{repair} > NPV_{replace} \quad (14-5)$$

dengan NPV dihitung terhadap seluruh biaya dan manfaat selama umur layanan. Hal ini dapat dilihat dalam studi LCCA yang menunjukkan bahwa strategi perbaikan yang mempertahankan komponen struktur sering kali lebih menguntungkan dibandingkan penggantian penuh, terutama ketika *service life extension* signifikan dicapai dengan *repair* yang tepat.

Perbandingan kuantitatif:

Alternatif	Biaya Awal	Umur Tambahan	LCC (30 th)
Repair lokal	1x	10-15 th	1.8x
Strengthening	2-3x	25-30 th	1.5x
Replacement	5-8x	50 th	1.3-1.6x

Benefit-Cost Ratio (BCR):

$$BCR = \frac{\sum \frac{Benefit_t}{(1+r)^t}}{\sum \frac{Cost_t}{(1+r)^t}} \quad (14-6)$$

Jika $BCR > 1 \rightarrow$ layak secara ekonomi.

Dalam banyak studi jembatan, strengthening menjadi optimal jika kerusakan $> 30\%$ kapasitas awal.

14.4 Model Optimasi Biaya-Kinerja-Risiko

Optimasi keputusan tidak hanya mempertimbangkan biaya akhir, tetapi juga kinerja fungsional dan risiko kegagalan struktur di masa datang. Model optimasi sering menggunakan teknik matematis seperti *multi-objective optimization* yang memasukkan tiga fungsi objektif utama: biaya, kinerja, dan risiko. Misalnya, fungsi objektif ganda dapat didefinisikan sebagai:

$$\min\{w_1 \cdot LCC + w_2 \cdot Risk + w_3 \cdot (1 - Perf)\} \quad (14-7)$$

Dimana:

- w_1, w_2, w_3 = bobot relatif untuk masing-masing kriteria
- *Risk* = probabilitas kegagalan pada waktu tertentu

- $Perf$ = indeks kinerja struktur (misalnya kapasitas residual)

Pendekatan ini menggabungkan *performance-based design*, *risk assessment*, dan *cost analysis* dalam satu kerangka kuantitatif.

Optimasi multi-objektif diformulasikan sebagai:

Minimasi:

$$\begin{aligned} f_1 &= LCC \\ f_2 &= P_f \\ f_3 &= CO_2 \end{aligned} \quad (14-8)$$

Dengan kendala:

$$\beta \geq \beta_{target} \quad (14-9)$$

Metode umum:

- Genetic Algorithm (GA)
- NSGA-II
- Particle Swarm Optimization (PSO)

Studi numerik menunjukkan optimasi berbasis reliabilitas dapat mengurangi LCC sebesar 12-25% dibanding pendekatan deterministik.

14.5 Social Cost dan Environmental Cost dalam Repair

Selain biaya langsung dan pemeliharaan, *repair* beton berdampak pula pada masyarakat (*social cost*) dan lingkungan (*environmental cost*). Social cost mencakup biaya yang tidak selalu terukur secara langsung di pasar, seperti gangguan lalu lintas selama kerja perbaikan, efek terhadap kesehatan masyarakat (polusi debu, kebisingan), dan biaya pengguna yang hilang karena gangguan layanan.

Environmental cost merupakan bagian dari LCCA bila dikombinasikan dengan LCA, di mana dampak lingkungan—misalnya emisi CO₂, penggunaan sumber daya, dan limbah konstruksi—diterapkan sebagai biaya moneter atau *external cost* untuk melakukan penilaian *triple bottom line*.

Total biaya sosial dapat dirumuskan:

$$SC = C_{\text{emission}} + C_{\text{traffic}} + C_{\text{accident}} + C_{\text{noise}} \quad (14-10)$$

Biaya karbon:

$$C_{\text{emission}} = E_{\text{CO}_2} \times \text{Carbon Price} \quad (14-11)$$

Dengan:

- Emisi repair beton $\approx 250\text{--}400 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$
- Harga karbon global 2024-2025: USD 40-100/ton

Jika repair menghasilkan 50 ton CO₂:

Dengan carbon price USD 70/ton $\rightarrow$ tambahan biaya USD 3,500.

Pada skala jaringan jembatan nasional, internalisasi carbon pricing dapat meningkatkan LCC 3-8%.

14.6 Carbon Pricing dan Implikasi terhadap Strategi Repair

Carbon pricing (pengenaan biaya terhadap emisi karbon) menjadi pendekatan ekonomis yang semakin penting dalam keputusan perbaikan struktur beton. Jika emisi CO₂ diberi harga (misalnya USD/ton CO₂), hal ini dapat diintegrasikan dalam LCCA sebagai *environmental cost*, sehingga opsi *repair* yang menghasilkan emisi rendah bisa menjadi lebih ekonomis dalam jangka panjang.

Penelitian terbaru menekankan perlunya integrasi LCA dan LCCA untuk mencerminkan biaya lingkungan secara nyata dan sistematis dalam strategi reparasi beton sebagai bagian dari tujuan keberlanjutan global (SDGs, netto-zero).

Strategi rendah karbon seperti:

- Penggunaan SCM 40-60%
- Low-carbon binder
- UHPC overlay tipis

Dapat menurunkan emisi hingga 30-50%.

Model optimasi karbon:

$$Min = LCC + \lambda \cdot CO_2 \quad (14-12)$$

Di mana λ adalah penalti karbon.

14.7 Skema Pembiayaan Infrastruktur dan Public-Private Partnership

Pemilihan strategi pembiayaan menjadi krusial terutama untuk proyek skala besar seperti jembatan, pelabuhan, dan infrastruktur publik lainnya. Pendekatan *Public-Private Partnership* (PPP) memungkinkan sektor swasta mengambil peran pada pembiayaan awal dengan kompensasi melalui struktur pembayaran jangka panjang (*availability payments*, *shadow tolls*, dll) berdasarkan pemenuhan kinerja LCCA dan KPI terkait *durability*. Skema ini membantu mengurangi beban langsung ke anggaran publik, namun mensyaratkan perencanaan biaya siklus hidup yang komprehensif agar manfaat bagi investor swasta dan publik sama-sama optimal.

Model pembiayaan meliputi:

- CAPEX pemerintah
- Availability payment scheme
- Performance-based maintenance contract

Dalam PPP, Net Present Revenue (NPR):

$$NPR = \sum \frac{Revenue_t - OPEX_t}{(1 + r)^t} - CAPEX \quad (14-13)$$

Proyek layak jika Internal Rate of Return (IRR) > Weighted Average Cost of Capital (WACC). Untuk proyek infrastruktur Indonesia, IRR target 10-14%.

14.8 Model Pengambilan Keputusan Multi-Kriteria (MCDM)

Model *multi-criteria decision making* (MCDM) membantu perencana memilih strategi perbaikan di mana beberapa kriteria harus dipertimbangkan secara bersamaan, seperti biaya, performa struktural, dampak lingkungan, dan aspek sosial. Metode MCDM yang umum digunakan termasuk *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), *Analytic Hierarchy Process* (AHP), dan *Weighted Aggregated Sum Product Assessment* (WASPAS), khususnya ketika kriteria ekonomi digabungkan dengan kriteria lainnya dalam keputusan desain beton berkelanjutan

Keputusan repair mempertimbangkan:

- Biaya (30-40%)
- Keandalan (25-30%)
- Emisi karbon (15-20%)
- Dampak sosial (10-15%)

Metode:

- AHP
- TOPSIS
- PROMETHEE

Skor total:

$$S_i = \sum w_j x_{ij} \quad (14-14)$$

Alternatif dengan skor tertinggi dipilih.

Studi kasus menunjukkan pendekatan MCDM meningkatkan transparansi dan konsistensi keputusan hingga 35% dibanding keputusan berbasis biaya saja.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abdelkader, E. M. *Synthesized evaluation of reinforced concrete bridge defects and NDT methods: A systematic review*. Buildings, 2023.
2. Akin, I. O., & Büyüksalih, G. *Life-cycle cost analysis of reinforced concrete bridges under corrosion and traffic loads*. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023.
3. ACI Committee 224. *Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-21)*. American Concrete Institute, 2021.
4. ACI Committee 357. *Guide for the Design and Construction of Marine Structures*. American Concrete Institute, 2021.
5. ACI Committee 503. *Use of Epoxy Compounds with Concrete*. American Concrete Institute, 2020.
6. ACI Committee 546. *Concrete Repair Guide*. American Concrete Institute, 2021.
7. ACI Committee 562. *Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures (ACI 562-21)*. American Concrete Institute, 2021.
8. Aggelis, D.G., Shiotani, T., Polyzos, D. Non-destructive evaluation of concrete damage using acoustic emission and ultrasonic techniques. *NDT & E International*, 2021.
9. Akiyama, M., Frangopol, D. M., & Xu, Z. *Probabilistic service life assessment of corroded concrete structures: A state-of-the-art review*. Structure and Infrastructure Engineering, 2025.
10. Alexander, M., Beushausen, H., De Belie, N. Durability design and performance of concrete repair systems. *Cement and Concrete Composites*, 2021.
11. Andrade, C. Service-life design and corrosion of reinforcement in concrete. *Materials and Corrosion*, 2021.
12. Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete – A review. *Cement and Concrete Research*, 2020.
13. ASTM C42, *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores*, ASTM, 2021.

14. ASTM C805/C805M-18, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, 2018.
15. ASTM C597/C597M – *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, 2016.
16. ASTM C876-22. *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM International, 2022.
17. ASTM C881/C881M-21. *Standard Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete*. ASTM International, 2021.
18. ASTM C1583/C1583M-20. *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. ASTM International, 2020.
19. Bajić, P., Leporace-Guimil, B., Andrade, C., Tošić, N., & de la Fuente, A. *Chloride-induced corrosion effects on structural performance with fibres*. *Applied Sciences*, 2025.
20. Bastidas-Arteaga, E. Reliability-based life-cycle assessment of concrete repair strategies. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023.
21. Bastidas-Arteaga, E., & Schoefs, F. *Reliability-based maintenance planning for reinforced concrete structures under chloride ingress: A life-cycle optimization approach*. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024.
22. Bentz, D.P., Weiss, W.J., Snyder, K.A. Shrinkage-reducing strategies and early-age cracking of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2020.
23. Belkowitz, J., Abdelrahman, M. A., & Cable, J. *Multi-objective optimization of maintenance strategies for reinforced concrete structures considering life-cycle cost and reliability*. *Engineering Structures*, 2024.
24. Bernal, S.A., Provis, J.L., Myers, R.J. Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives. *Cement and Concrete Research*, 2021.

25. Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferri, P., Redaelli, E. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley-VCH, 2020.
26. Beushausen, H., Alexander, M. Bond strength development between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research*, 2023.
27. Alexander, M., Beushausen, H. *Durability, service life and repair of concrete structures: State of the art*. Cement and Concrete Research, 2024.
28. Cha, Y.J., et al., *Deep learning-based crack detection*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021.
29. Chen, Z., Li, Q., & Ellingwood, B. R. *Decision optimization for maintenance of aging concrete infrastructure based on stochastic deterioration modeling and digital twin integration*. Journal of Infrastructure Systems, 2025.
30. Chen, H., et al. *Durability-oriented design of cement-based repair materials*. Materials & Design, 2024.
31. Cho, H.-C., Lee, S.-H., Park, M., & Kim, K. S. (2025). *Remaining service life evaluation of reinforced concrete buildings considering failure probability of members*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2025.
32. Christodoulou, C., Glass, G.K., Webb, J. Cathodic protection of reinforced concrete structures: Principles and practice. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2021.
33. Courard, L., Garbacz, A., Draps, P. Surface preparation techniques and bond performance of concrete repair systems. *Construction and Building Materials*, 2021.
34. Cramer, S. M., & Bae, S. (2025). *Incorporating social cost and user delay cost in life cycle cost analysis of infrastructure repair*. Journal of Infrastructure Systems, 2025.
35. Courard, L., et al. *Recent advances in concrete repair materials and systems*. Construction and Building Materials, 2024.
36. Cusson, D., Lounis, Z. Effect of curing on durability of concrete repair materials. *Cement and Concrete Composites*, 2023.

37. De Belie, N., Lenehan, J., Braam, C.R. Chemical and biological deterioration of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2022.
38. De Muynck, W., De Belie, N., Verstraete, W. Biogenic sulfuric acid attack of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2020.
39. Dorafshan, S., et al., *UAV-based inspection of reinforced concrete bridges*, Construction and Building Materials, 2020.
40. Emmons, P.H., Vaysburd, A.M. Performance-based concrete repair. *ACI Materials Journal*, 2020.
41. EN 1504 (Parts 1–10). *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures*. European Committee for Standardization (CEN), 2020.
42. EN 206. *Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity*. European Committee for Standardization (CEN), 2020.
43. Fardis, M.N., *Seismic assessment of existing concrete structures*, Springer, 2021.
44. fib Bulletin 34. *Model Code for Service Life Design*. Fédération internationale du béton, 2020.
45. fib Bulletin 90. *Durability of Concrete Structures*. Fédération internationale du béton, 2021.
46. fib Model Code 2020. *Structural Concrete*. Fédération internationale du béton, 2020.
47. Fournier, B., Bérubé, M.A., Thomas, M.D.A. Alkali-silica reaction in concrete structures: Diagnosis and mitigation. *Construction and Building Materials*, 2023.
48. Frangopol, D. M., & Rosowsky, D. V. *Life-cycle cost optimization of aging concrete bridges under uncertainty*. Structural Safety, 2023.
49. Gálvez, J.C., Planas, J., Sancho, J.M. Crack control and repair strategies in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 2022.
50. Gartner, E., Scrivener, K.L. Opportunities for low-CO₂ cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 2021.

51. Granata, M. F. *Seismic retrofit of concrete buildings damaged by corrosion: A case study in southern Italy*. Buildings, 2024.
52. Global Infrastructure Hub. *Infrastructure monitor 2024 report: Global trends in infrastructure investment*. 2024.
53. G. Morgenthal, N. Hallermann, V. Rodehorst, et al., "Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges," *Automation in Construction*, 2019.
54. Gucunski, N., et al. Nondestructive evaluation and monitoring of concrete infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022.
55. Gucunski, N., et al. Next-generation NDT for condition assessment of concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2025.
56. H. Huang, H. Liu, J. Hu, J. Wei, Z. Jiang, G. Ye, and Q. Yu, "Micromechanical properties of interfacial transition zone between carbon fibers and UHPC matrix based on nano-scratching tests," *Cement and Concrete Composites*, , 2023
57. Hooton, R.D., Bickley, J.A. Durability-based design for concrete repair. *Construction and Building Materials*, 2022.
58. ISO 12696:2020. *Cathodic Protection of Steel in Concrete*. International Organization for Standardization, 2020.
59. ISO 13823:2020. *General Principles on the Design of Structures for Durability*. International Organization for Standardization, 2020.
60. J. Davidovits and F. Davidovits, "Ancient geopolymers in South-American Monuments, Part IV: use of natural andesite volcanic sand (not crushed)," *Journal on Geopolymer Science Applied to Archaeology*, 2020.
61. J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, Alkali-activated materials and geopolymers: Past, present, and future, *Cement and Concrete Research*, 2022.
62. Jonbi., et al. Palm oil boiler ash as a viable substitute for cement. *Result in Engineering*, 2025
63. Katayama, T. ASR mechanisms and mitigation measures. *Materials and Structures*, 2020.

64. Kim, S., & Frangopol, D. M. Risk-based maintenance planning of deteriorating bridges using probabilistic performance prediction and digital twin framework. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024.
65. Kumar, R., & Banerjee, S. (2025). *Circular economy strategies for sustainable repair of reinforced concrete infrastructure*. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2025.
66. Kwon, S.-J., Lim, K.-M., Kim, K.-C., et al. *Probabilistic analysis of chloride ingress repair costs considering external forces and vulnerable sections of RC girders*. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2025.
67. Liu, H., Wang, X., & Melchers, R. E. (2024). *Time-dependent reliability updating of reinforced concrete structures under chloride attack using monitoring data*. *Engineering Failure Analysis*, 2024.
68. Lee, J., Nguyen, K. A., & Stewart, M. G. *Multi-objective optimization for risk-informed infrastructure maintenance under uncertainty and real-time monitoring data*. *Engineering Structures*, 2024.
69. Li, V.C., Wang, S., Wu, C. Engineered cementitious composites for durable repair applications. *Cement and Concrete Composites*, 2023.
70. Li, V.C., et al. ECC overlays for sustainable and durable concrete repair. *Cement and Concrete Composites*, 2024.
71. L. J. Gardner *et al.*, "Temperature transformation of blended magnesium potassium phosphate cement binders," *Cement and Concrete Research*, 2021.
72. Li, Q., & Liu, J. (2024). *Carbon footprint assessment and performance trade-offs in sustainable concrete repair systems*. *Journal of Cleaner Production*, 2024.
73. Malomo, L. *Evaluation of Government Policies in Infrastructure Development: Effectiveness, Challenges, and Community Impact*. *Inspirat*, 2025.
74. Masi, A., et al., *Performance-based assessment of existing RC structures*, *Engineering Structures*, 2020.

75. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education, 2014.
76. Miller, R.A. et al., *Life-cycle assessment of concrete repair*, Journal of Cleaner Production, 2021.
77. Momber, A. Surface preparation technologies for concrete repair. *Wear*, 2021.
78. Morgan, D.R., *Compatibility of concrete repair materials*, Construction and Building Materials, 2020.
79. Neville, A.M. *Properties of Concrete*. Pearson Education, 2011.
80. Nguyen, T. H., Kim, S., & Frangopol, D. M. *Bayesian updating and stochastic decision modeling for bridge maintenance management supported by digital twin systems*. Structural Safety, 2025.
81. OECD. *Infrastructure governance for sustainable development*. OECD Publishing. 2023
82. Otieno, M., Beushausen, H., Alexander, M. Modelling chloride-induced corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 2022.
83. Papadakis, V.G., *Carbonation-based service-life modeling*, Cement and Concrete Composites, 2020.
84. Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Ding, Y. Eco-efficient repair materials for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, 2023.
85. Palin, D., Wiktor, V., Jonkers, H.M. A review of self-healing mechanisms in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 2022.
86. Pinho, R., et al., *Residual capacity of deteriorated RC structures*, Bulletin of Earthquake Engineering, 2022.
87. Qiu, S., Zaheer, Q., Ali, F., Wajid, S., Chen, H., Ai, C., & Wang, J. *Exploring the impact of digital twin technology in infrastructure management: A comprehensive review*. Journal of Civil Engineering and Management. 2025
88. R. E. Melchers and A. T. Beck, *Structural Reliability Analysis and Prediction*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2018.

89. Poursaei, A. *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. Elsevier, 2022.
90. Provis, J.L. Alkali-activated materials in aggressive exposure conditions. *Cement and Concrete Research*, 2020.
91. Provis, J.L., Bernal, S.A. Alkali-activated materials for repair applications: Progress and challenges. *Cement and Concrete Research*, 2024.
92. Raupach, M. Durability and repair of reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 2020.
93. Rusnak, C. R. *Sustainable Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Infrastructure*. Infrastructures, 2025.
94. Santhanam, M., Cohen, M.D., Olek, J. Mechanisms of sulfate attack in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2021.
95. Siddique, R., & Chahal, N. K. Self-healing concrete: From laboratory to field applications. *Materials Today Sustainability*, 2024.
96. Scrivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M. Eco-efficient cements: Potential and challenges. *Cement and Concrete Research*, 2021.
97. Scrivener, K.L., et al. Eco-efficient cement-based materials for repair and retrofit. *Cement and Concrete Research*, 2024.
98. Schindler, A.K., et al., *Thermal effects relevant to concrete repair*, ACI Materials Journal, 2021.
99. Shi, C., Jiménez, A.F., Palomo, A. New cements for the 21st century: Repair applications. *Cement and Concrete Composites*, 2021.
100. Sisomphon, K., Copuroglu, O., Fraaij, A. Self-healing of cracks in cementitious materials. *Materials and Structures*, 2022.
101. Stewart, M.G. Life-cycle performance of repaired reinforced concrete structures. *Structural Safety*, 2022.
102. Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. *Digital twin and big data towards smart construction: A review*. Journal of Management in Engineering, 2024.

103. Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., Johari, M. A. M., & Voo, Y. L. Durability performance of ultra-high-performance concrete for long-term infrastructure sustainability. *Journal of Building Engineering*, 2025.
104. Tang, L., Nilsson, L.-O. Chloride transport and durability of concrete. *Cement and Concrete Research*, 2021.
105. Thomas, M.D.A. Sulfate resistance of concrete and mitigation techniques. *Cement and Concrete Research*, 2020.
106. Van Breugel, K., Schlangen, E., Qian, S. Performance-based concrete repair and durability concepts. *Materials and Structures*, 2021.
107. Van Tittel boom, K., & De Belie, N. Advances in self-healing concrete technologies for sustainable infrastructure. *Cement and Concrete Composites*, 147, 2024.
108. Val, D. V., Andrade, C., Sýkora, M., Stewart, M. G., Bastidas-Arteaga, E., Mlcoch, J., Truong, Q. C., & El Soueidy, C.-P. (2025). *Probabilistic modelling of deterioration of reinforced concrete structures*. *Structural Safety*, 2025.
109. Washer, G.A., et al. Bridge inspection and evaluation using nondestructive methods. *Journal of Bridge Engineering*, 2021.
110. Wang, J., et al. *Durable geopolymer-based repair systems for aggressive environments*. *Materials & Design*, 2024.
111. Wang, X., Li, Y., & Zhang, W. *Digital twin-driven risk assessment and reliability updating of reinforced concrete structures in marine environments*. *Automation in Construction*, 2025.
112. World Economic Forum. (2024). *Net-zero infrastructure roadmap 2050*. World Economic Forum.
113. Xu, L.Y., Zhang, D., Li, H. Digital monitoring and artificial intelligence in infrastructure maintenance. *Automation in Construction*, 2024.
114. Xu, L.Y., et al. AI-driven monitoring and assessment of concrete infrastructure. *Automation in Construction*, 2024.
115. Yang Zhao, S. Yang, K. Sisomphon, O. Copuroglu dan E. A. B. Koenders A phase-field approach for portlandite

- carbonation and application to self-healing cementitious materials *Materials and Structures*, 2022.
116. Yu, K., Li, V.C. ECC overlays for durable repair of concrete structures. *Structures*, 2023.
117. Yu, K., et al. Recent developments in ECC for infrastructure repair. *Structures*, 2024.
118. Yuan, F., Kim, H., & Chen, W. (2025). *Machine learning-based predictive maintenance for reinforced concrete structures under chloride exposure*. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2025.
119. Zanotti, C., et al., *Interface behavior of repair mortars*, *Cement and Concrete Composites*, 2022.
120. Zhang, P., et al. *Low-carbon repair materials: Performance, durability and service life*. *Journal of Cleaner Production*, 2025.

INDEKS ISTILAH

A

Abrasi beton, Bab 2, 9, 10
 Acid attack (serangan asam), Bab 2, 9
 ACI 224R, Bab 1, 7, 11
 ACI 562, Bab 1, 4, 11, 12
 Adhesion / kuat lekat, Bab 4, 5, 11
 Alkali-Silica Reaction (ASR), Bab 2, 9
 Asset management infrastruktur, Bab 1, 10, 11, 12

B

Biodeterioration beton, Bab 2, 9
 Bond strength, Bab 4, 5, 11
 Bridge repair, Bab 10, 12
 BIM (Building Information Modeling), Bab 6, 10, 12

C

Carbonation, Bab 2, 8
 Cathodic protection, Bab 8, 10
 Chloride ingress, Bab 2, 8, 10
 Coating beton, Bab 7, 9, 10
 Concrete durability, Bab 1, 4, 9
 Crack injection, Bab 7
 Crack sealing, Bab 7
 Curing repair mortar, Bab 5, 11

D

Damage mechanism, Bab 2
 Delamination, Bab 2, 8
 Design life, Bab 1, 4, 11

Diagnosis kerusakan beton, Bab 3
Digital twin, Bab 12
Durability-based design, Bab 4, 9, 12

E

ECC (Engineered Cementitious Composite), Bab 6, 7, 10, 12
Electrochemical repair, Bab 8
Erosion beton, Bab 2, 9
EN 1504, Bab 1, 4, 7, 11, 12
Environmental exposure class, Bab 4, 9

F

Fatigue beton, Bab 2
fib Model Code 2020, Bab 1, 4, 11, 12
FRP strengthening, Bab 7
Functional repair, Bab 4

G

Geopolymer repair material, Bab 6, 9, 10
Green repair technology, Bab 6, 12

H

Hydrodemolition, Bab 11
High-performance repair mortar, Bab 5

I

Inspection methods, Bab 3
Interface behavior, Bab 4, 11
ISO 12696, Bab 8, 10, 11

K

Karbonasi beton, Bab 2, 8
 Klorida (ion klorida), Bab 2, 8, 10
 Korosi tulangan, Bab 2, 8

L

Life-cycle cost, Bab 1, 4, 11
 Life-cycle management, Bab 1, 11, 12
 Low-carbon repair materials, Bab 6, 12

M

Marine environment, Bab 10
 Material compatibility, Bab 4, 5
 Microcracking, Bab 2, 7
 Monitoring struktur, Bab 10, 11, 12

N

NDT (Non-Destructive Testing), Bab 3, 11

O

Overlay beton, Bab 7, 10
 Offshore structures, Bab 10

P

Patch repair, Bab 8, 10
 Performance-based repair, Bab 4, 11, 12
 Permeability beton, Bab 4, 9
 Polymer-modified mortar, Bab 5
 Preventive maintenance, Bab 1, 12

Q

Quality control (QC), Bab 11

R

Re-alkalisation, Bab 8

Rehabilitation beton, Bab 1, 4

Repair design principles, Bab 4

Residual service life, Bab 4, 11

S

Self-healing concrete, Bab 6, 7, 12

Service life prediction, Bab 4, 11

Shrinkage cracking, Bab 2

Splash zone, Bab 10

Spalling beton, Bab 2, 8

Strengthening beton, Bab 1, 7

Sulfate attack, Bab 2, 9

Surface preparation, Bab 11

T

Thermal cracking, Bab 2

Tidal zone, Bab 10

U

UHPC (Ultra-High Performance Concrete), Bab 6, 10

Underwater repair, Bab 10

V

Visual inspection, Bab 3, 11

W

Waterproofing systems, Bab 7, 9

Naskah Pengajuan ISBN



Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, S.T., M.T.

Lahir di Sibuluan (Sarudik, Sibolga, Tapanuli Tengah) pada 14 Juli 1971, Pendidikan S1 Teknik Sipil di Universitas Jayabaya (1995), S2 Teknik Sipil di Universitas Indonesia (2009), S3 Teknik Sipil di Institut Teknologi Bandung (2015), serta Pendidikan Profesi Insinyur di Universitas Negeri Medan (2023). Saat ini berprofesi sebagai Dosen pada Universitas Tama Jagakarsa Jakarta dan memiliki sertifikasi Dosen sebagai Dosen Profesional di bidang Teknik Sipil, menjabat sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tama Jagakarsa. Selain itu, berperan sebagai Asesor Beban Kerja Dosen (BKD) Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi serta Asesor Kompetensi Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP). Aktif di bidang industri sebagai Kepala Laboratorium PT Mixindo Abadi Karya dan Komisaris Utama PT Barokah Konstruksi Engineering. Keaktifan profesional juga tercermin melalui keanggotaan dalam berbagai organisasi, antara lain HAKI, ADI, ATAHI, ISSC, PII, AISC, HATTI, PAPTI, PPAKI, AKBG, dan IASPRO.



Dr. Partogi H. Simatupang, ST., MT

Lahir di Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara pada tanggal 20 Januari 1975. Pendidikan tingkat Sarjana (S1), Magister (S2) dan Doktor (S3) di bidang Teknik Sipil Bidang Keahlian Rekayasa Struktur di Institut Teknologi Bandung (ITB) berturut-turut diselesaikan pada tahun 1998, 2002 dan 2013. Sejak tahun 2000 hingga sekarang, penulis menjadi dosen tetap prodi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana di Kupang, Provinsi NTT. Penulis pernah menjadi dosen teladan dan ketua prodi teladan di tingkat Fakultas Sains dan Teknik (FST) Universitas Nusa Cendana pada tahun 2015 dan 2016. Hingga sekarang penulis aktif sebagai anggota HAKI/Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia, Intakindo Prov NTT, HPJI NTT dan PII Cabang Provinsi NTT. Penulis memiliki minat pengajaran, penelitian serta pengabdian masyarakat pada beberapa topik diantaranya : material berbasis semen dan non-semen, ferosemen, perbaikan dan kekuatan struktur, program komputer/aplikasi software teknik sipil, mekanika rekayasa, dan rekayasa kegempan.



Penerbit Yayasan
John Hi-Tech Idetama
Jl. Rawa Bambu Raya No. 17 A
Pasar Minggu Jakarta 12520
Anggota IKAPI No. 566/DKI/2018

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Yang bertandatangan di bawah ini :

1. Nama : Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.
Alamat : Jl. H. Bain No. 25 RT 005 RW 006, Kelapa Dua
Wetan Ciracas Jakarta Timur

NIP : 197107142005011001 :
HP : 081219114867
2. Nama : Dr. Partogi H Simatupang, ST., MT.
Alamat : Jl. Jl. Gereja Emaus Rt 19 RW 05. Kel Liliba, Kematan
Oebobo 25 Kota Kupang, Provinsi NTT.

NIP : 197501202000121001 :
HP : 08113820175

menyatakan dengan sesungguhnya, bahwa :

Judul : **CONCRETE REPAIR TECHNOLOGY**
From Damage Mechansme To Sustainable Infrastructue

3. Penulis : Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.
Dr. Partogi H Simatupang, ST., MT.

adalah benar merupakan karya asli yang dibuat untuk diterbitkan dan disebarluaskan secara umum, melalui :

Penerbit : Yayasan John Hi-Tech Idetama
Alamat : Jl. Rawa Bambu Raya No. 17 A Pasar Minggu
Jakarta 12520

Demikian surat ini dibuat dengan sebenar-benarnya serta akan menjadi pertanggungjawaban kami jika terdapat penyalahgunaan dan akibat yang ditimbulkannya.

Jakarta, 21 Mei 2025

Penulis pertama,

Penulis kedua



Dr. Ir. Pio Ranap Tua Naibaho, ST., MT.



Dr. Partogi H Simatupang, ST., MT.